

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Ricardo Boni Gomes Rolim

**Contribuição aos modelos de comportamento da resistência à
compressão do concreto**

**São Paulo
2025**

Ricardo Boni Gomes Rolim

Contribuição aos modelos de comportamento da resistência à compressão do concreto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Habitação: Planejamento e Tecnologia

Data da aprovação 29/08/2025



Prof. Dr. Paulo Helene (Orientador)
Docente do Mestrado Profissional em
Habitação: Planejamento e Tecnologia

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene (Orientador)
Docente do Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia

Prof. Dr. Rafael Alves de Souza (Membro)
UEM – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Henrique Almeida Santana (Membro)
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Ricardo Boni Gomes Rolim

Contribuição aos modelos de comportamento da resistência à compressão do concreto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Habitação: Planejamento e Tecnologia.

Área de Concentração: Tecnologia em Construção de Edifícios – TCE

Linha de Pesquisa: Materiais e componentes da construção

Orientador: Prof. Dr. Paulo Helene

São Paulo
Ago./2025

Ficha Catalográfica
Elaborada pela GITEB – Gerência de Gestão da Informação Tecnológica e Bibliográfica
do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

R748c **Rolim, Ricardo Boni Gomes**

Contribuição aos modelos de comportamento da resistência à compressão do concreto. / Ricardo Boni Gomes Rolim. São Paulo, 2025.
377p.

Dissertação (Mestrado em Habitação) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Planejamento, Gestão e Projeto.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

1. Resistência à compressão do concreto 2. Estruturas de concreto 3. Segurança estrutural 4. Tese I. Helene, Paulo Roberto do Lago, orient. II. IPT. Unidade de Negócios em Ensino Tecnológico III. Título

2025-28

CDU 666.972(043)

DEDICATÓRIA

À minha querida família: Lineu, Vera Lucia, Anna Carolina, Anna Beatriz, Maurício, Eloá, Lucca e Maya.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço aos docentes da Escola Politécnica da USP, *alma mater*, principalmente aos Professores do Departamento de Engenharia de Construção Civil: Prof.^a Dra. Silvia Maria de Souza Selmo e Prof. Dr. Vahan Agopyan.

Agradeço também aos Professores do Programa de Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), especialmente: Prof. Dr. Cláudio Vicente Mitidieri Filho, Prof. Dr. Ercio Thomaz e Prof. Dr. Valdecir Angelo Quarcioni.

Aos membros da banca examinadora de mestrado Prof. Dr. Rafael Alves de Souza e Prof. Dr. Henrique Almeida Santana pelos valiosos comentários e criteriosa avaliação.

A todos engenheiros da PhD Engenharia, especialmente aos Eng. M.Sc. Douglas Couto, Eng.^a Jessika Pacheco, Eng. Rafael Silva, Eng. Cristian Espinoza e Eng. Matheus Chernichenco, colegas e parceiros nos desafios do dia a dia profissional.

Ao Eng. Dr. Carlos Britez, com quem tive o enorme prazer de trabalhar e aprender.

Por fim, agradeço ao Prof. Dr. Paulo Helene pelas orientações e incansável dedicação em ensinar.

RESUMO

O material concreto é complexo, chega no estado fresco no canteiro de obras, ainda em processo de fabricação e suas propriedades dependem de vários fatores. A resistência à compressão, sua principal propriedade tecnológica, varia dia a dia durante a vida útil da estrutura. Esta dissertação procura contribuir na previsão do comportamento da resistência à compressão ao longo do tempo, item fundamental na introdução da segurança no projeto das estruturas de concreto. Apresenta-se um minucioso estudo dos principais modelos teóricos usados desde a década de 1890 para representar o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto com a idade, entre eles o modelo de Féret, modelo de Abrams, modelo de Powers, modelo ACI Committee 209, modelo *fib* Model Code 2020, incluindo o modelo de Hubert Rüsch que representa o decréscimo da resistência devido ao efeito das cargas elevadas de longa duração e sua influência no desenvolvimento da resistência à compressão do concreto. Analisa-se detalhadamente os coeficientes de crescimento da resistência à compressão do concreto a partir de 20.000 resultados experimentais. Compara-se os resultados com as curvas teóricas preconizadas em normas e códigos modelo atualmente em vigor, com ênfase no modelo proposto pelo *fib* Model Code for Concrete Structures (2020) reconhecido e adotado nacional e internacionalmente. Fomenta-se a discussão sobre o valor a ser adotado como resistência de projeto, f_{cd} incluindo o coeficiente redutor da resistência de cálculo do concreto α_{cc} do *fib* Model Code 2020, empregado na avaliação de seções comprimidas e associado ao desenvolvimento das curvas de resistência à compressão do concreto com a idade.

Palavras-chave: concreto; resistência à compressão do concreto; modelos teóricos; segurança estrutural.

ABSTRACT

Contribution to behavior models of concrete compressive strength

Concrete is a complex material, arriving fresh at the construction site, still in the manufacturing process, and its properties depend on several factors. Compressive strength, its main technological property, varies day by day during the service life of the structure. This dissertation aims to contribute to the behavior prediction of compressive strength over time, a fundamental item in the safety assessment in design of concrete structures. A detailed study of the main theoretical models used since the 1890's to represent the development of concrete compressive strength with age is presented, including the F  ret model, Abrams model, Powers model, ACI Committee 209 model, *fib* Model Code 2020 model, including the Hubert Rüsch model that represents the decrease in strength due to the effect of sustained loads and their influence on the development of concrete compressive strength. The growth coefficients of the compressive strength of concrete are analyzed in detail based on 20,000 experimental results. The results are compared with the theoretical curves recommended in standards and model codes currently in force, with emphasis on the model proposed by the *fib* Model Code for Concrete Structures (2020), recognized and adopted in Brazil and internationally. Discussion is encouraged on the value to be adopted as design resistance, f_{cd} including the reduction coefficient of the concrete design strength α_{cc} of the *fib* Model Code 2020, used in the evaluation of compressed sections and associated with the development of concrete compressive strength curves with age.

Keywords: concrete; compressive strength of concrete; theoretical models; structural safety.

Lista de ilustrações

Figura 1.1	Evolução do consumo de cimento no Brasil e no mundo	25
Figura 2.1	Linha do tempo indicando pesquisadores e modelos teóricos, de 1818 até 1945	44
Figura 2.2	Linha do tempo indicando pesquisadores e modelos teóricos, de 1945 até 1971	45
Figura 2.3	Linha do tempo indicando pesquisadores e modelos teóricos, de 1971 até os dias atuais	46
Figura 3.1	Processo de produção do clínquer de cimento Portland no interior do forno rotativo	50
Figura 3.2	Transformações mineralógicas no interior do forno de clínquer, em função da temperatura	51
Figura 3.3	Desenvolvimento da resistência à compressão ao longo do tempo dos principais compostos do cimento Portland	52
Figura 3.4	Curva típica do fluxo do calor de hidratação do cimento Portland	55
Figura 3.5	Desenvolvimento dos compostos hidratados do cimento Portland em função do tempo (à esquerda) e em função do grau de hidratação (à direita)	56
Figura 3.6	Representação esquemática dos compostos da pasta de cimento hidratada C-S-H, CH (portlandita) e C-A-Š-H (etringita)	57
Figura 3.7	Etapas de hidratação de uma partícula de cimento Portland	59
Figura 3.8	Representação esquemática da distribuição de partículas de cimento Portland.	61
Figura 3.9	Curva de distribuição de Weibull (ou de Rosin-Rammler) aplicada ao tamanho das partículas de cimento Portland	63
Figura 3.10	Relação entre a finura do cimento Portland e a resistência à compressão do concreto em diferentes idades	63
Figura 3.11	Ilustração representando o desenvolvimento dos compostos hidratados do cimento Portland	65
Figura 3.12	Intervalo dimensional dos poros e dos produtos de hidratação presentes na pasta de cimento Portland	66
Figura 3.13	Resistência à compressão em função da porosidade de pastas de cimento Portland	67
Figura 3.14	Gráfico das curvas dos modelos teóricos e resultados de resistência à compressão para porosidades variando de 10% a 35%	68
Figura 3.15	Modelo esquemático das formas de água associadas ao C-S-H	70
Figura 3.16	Gráfico da resistência à compressão relativa do concreto em função da variação da relação água/cimento (w/c)	71
Figura 3.17	Gráfico do grau de hidratação em função da idade para os principais compostos do cimento Portland	72
Figura 3.18	Gráfico do grau de hidratação do cimento Portland (α) vs. tempo (t), de acordo com o modelo Knudsen de 1984	75

Figura 3.19	Desenvolvimento relativo da resistência à compressão do concreto em diferentes temperaturas	76
Figura 3.20	Efeito da temperatura inicial no desenvolvimento da resistência à compressão do concreto	77
Figura 3.21	Efeito da temperatura no desenvolvimento da resistência à compressão do concreto produzido com 3 diferentes tipos de cimento	78
Figura 3.22	Relação entre resistências à compressão obtidas em ensaios lentos (cargas mantidas) e de curta duração	80
Figura 3.23	Efeito combinado do crescimento e do decréscimo relativos da resistência à compressão do concreto, de acordo com a idade de aplicação da carga mantida	82
Figura 3.24	Efeito combinado do crescimento e do decréscimo relativos da resistência à compressão do concreto produzido com cimento de endurecimento normal, de acordo com a idade de aplicação da carga mantida	83
Figura 3.25	Fatores intervenientes na resistência à compressão do concreto	84
Figura 4.1	Gráfico da resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade <i>vs.</i> relação água/cimento em volume (w_v/c_v)	88
Figura 4.2	Resistência à compressão (lb/in ²) <i>vs.</i> relação gel/espço	93
Figura 4.3	Representação esquemática das proporções volumétricas antes da hidratação do cimento (à esquerda) e durante a hidratação do cimento (à direita)	94
Figura 4.4	Diagrama de hidratação indicando o desenvolvimento dos volumes de compostos da pasta produzida com 100 kg de cimento e relação $w/c = 0,5$, em massa, para $0 \leq \alpha \leq 1$	100
Figura 4.5	Gráfico da relação gel/espço em função do grau de hidratação para relações água/cimento variando de $0,36 \leq w/c \leq 0,80$	101
Figura 4.6	Gráficos do volume da pasta (cm ³) <i>vs.</i> relação água/cimento para graus de hidratação: $\alpha = 0$, $\alpha = 0,33$, $\alpha = 0,67$ e $\alpha = 1$ (hidratação completa)	103
Figura 4.7	Resistência à compressão (MPa) <i>vs.</i> relação gel/espço	104
Figura 4.8	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto <i>vs.</i> tempo e resultados experimentais	107
Figura 4.9	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão até os 28 dias de idade, de acordo com o modelo ACI Committee 209	109
Figura 4.10	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão até 50 anos de idade, de acordo com o modelo ACI Committee 209	109
Figura 4.11	Envoltória das curvas de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto, de acordo com o modelo ACI Committee 209	112
Figura 4.12	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão até os 28 dias de idade, conforme modelo CEB-FIP Model Code 1990 e <i>fib</i> Model Code 2010	118

Figura 4.13	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão até os 50 anos de idade, conforme modelo CEB-FIP Model Code 1990 e <i>fib</i> Model Code 2010	119
Figura 4.14	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão até os 50 anos de idade, considerando $t_{ref} = 28$ dias, conforme modelo <i>fib</i> Model Code 2020	123
Figura 4.15	Curvas de crescimento de resistência à compressão até os 50 anos de idade, considerando $t_{ref} = 91$ dias, conforme modelo <i>fib</i> Model Code 2020	123
Figura 4.16	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão, conforme Eurocode 2:2023, considerando $t_{ref} = 91$ dias e $T_{(\Delta t_i)} = 20^{\circ}\text{C}$	126
Figura 4.17	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão, conforme ABNT NBR 6118:2023	127
Figura 4.18	Variação relativa da resistência à compressão do concreto com a idade, de acordo com a Equação 2.11	128
Figura 4.19	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto, conforme normas ABNT NBR 7197:1989 e ABNT NBR 6118:2023	129
Figura 4.20	Curvas de crescimento relativo da resistência para concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial e de endurecimento normal	131
Figura 4.21	Envoltórias dos modelos teóricos propostos pelo ACI Committee 209 e <i>fib</i> Model Code for Concrete Structures 2020	134
Figura 4.22	Curvas teóricas de crescimento relativo da resistência para concreto C40, conforme modelos ACI 209 (curva na cor preta) e <i>fib</i> Model Code 2020 (curva na cor cinza)	135
Figura 4.23	Representação gráfica do histórico de tempo-temperatura do concreto, de acordo com a função maturidade Nurse-Saul e do conceito de tempo equivalente (t_e)	138
Figura 4.24	Curvas de crescimento relativo da resistência considerando $s_c = 0,4$ e temperaturas de 10°C , 20°C e 40°C , conforme <i>fib</i> Model Code 2020	142
Figura 4.25	Curvas de crescimento relativo da resistência considerando $s_c = 0,5$ e temperaturas de 10°C , 20°C e 40°C , conforme <i>fib</i> Model Code 2020	142
Figura 4.26	Variação do parâmetro de maturidade $\beta_{t_0}(t_0)$ para cargas aplicadas entre os 7 dias e 1 ano de idade	145
Figura 4.27	Efeito do decréscimo relativo da resistência à compressão em função da carga mantida $\beta_{c,sus}(t, t_0)$, aplicada aos 28 e 365 dias, conforme equação proposta pelo <i>fib</i> Model Code 2020	146
Figura 4.28	Efeito combinado do crescimento e do decréscimo relativos da resistência à compressão do concreto produzido com cimento de endurecimento normal ($s_c = 0,4$), de acordo com a idade de aplicação da carga mantida. Modelo <i>fib</i> Model Code 2020	147

Figura 4.29	Envoltórias das curvas de desenvolvimento da resistência à compressão para cargas aplicadas aos 28 dias de idade, considerando concretos com $0,1 \leq s_c \leq 0,6$. Modelo <i>fib</i> Model Code 2020	148
Figura 4.30	Envoltórias das curvas de desenvolvimento da resistência à compressão para cargas aplicadas aos 365 dias (1 ano) de idade, considerando concretos com $0,1 \leq s_c \leq 0,6$. Modelo <i>fib</i> Model Code 2020	148
Figura 5.1	Esquema simplificado da sequência a seguir no dimensionamento de estruturas de concreto pelo método semi-probabilista ou dos fatores parciais, segundo <i>fib</i> Model Code 2020	152
Figura 5.2	Representação simplificada dos valores das ações e das resistências, valores médios (F_m e f_m), característicos (F_k e f_k) e de projeto (F_d e f_d)	154
Figura 5.3	Esquema simplificado da sequência a seguir no dimensionamento de estruturas pelo método semi-probabilista, focando no concreto, <i>fib</i> Model Code 2020	155
Figura 5.4	Curva de distribuição normal f_{cm} e f_{ck}	156
Figura 5.5	Curva de distribuição normal para resistências potencial e efetiva, considerando coeficiente de ponderação proposto pelo <i>fib</i> Model Code 2020	161
Figura 5.6	Relação entre resistências obtidas em ensaios lentos e rápidos ($f_{cc,t} / f_{c,t}$) em função do tempo (Δt) após o início do carregamento (t_0)	165
Figura 5.7	Curvas de crescimento e decréscimo relativos da resistência à compressão do concreto	165
Figura 6.1	Representação linear das curvas de crescimento da resistência à compressão propostas pelo <i>fib</i> Model Code 2020	173
Figura 6.2	Exemplo da representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão da amostra apresentada na Tabela 6.1	175
Figura 6.3	Exemplo da representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão para 300 amostras de concreto	177
Figura 6.4	Curvas de crescimento relativo da resistência para o concreto $s_c = 0,32$, para $t_{ref} = 28$ dias, $t_{ref} = 63$ dias e $t_{ref} = 91$ dias	178
Figura 6.5	Curvas de decréscimo relativo da resistência à compressão até os 50 anos de idade em função da data de aplicação da carga elevada de longa duração	180
Figura 6.6	Envoltória das curvas de evolução relativa da resistência à compressão até os 50 anos de idade para cargas elevadas de longa duração aplicadas a 28 e 365 dias, com $t_{ref} = 28$ dias	181
Figura 7.1	Representação linear da curva de crescimento do concreto produzido com o cimento D, tipo CP I, $w/c = 0,5$	183
Figura 7.2	Envoltória das curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de concretos produzidos com cimento tipo CP I, Fábricas A, D e S, da pesquisa de Amaral Filho (1945)	184

Figura 7.3	Coeficiente s_c em função da relação água/cimento (w/c) para concretos produzidos com cimento CP I das Fábricas A, D e S, da pesquisa de Amaral Filho (1945)	185
Figura 7.4	Representação linear da curva de crescimento do concreto produzido com o cimento B, tipo CP I, $w/c = 0,45$	187
Figura 7.5	Envoltória das curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de concretos produzidos com cimento tipo CP I, Marcas A, B e C, da pesquisa de Tango (1983)	189
Figura 7.6	Valores do coeficiente de crescimento s_c ao longo do tempo para concretos produzidos com cimento tipo CP I, da marca A, para diferentes relações w/c	190
Figura 7.7	Valores do coeficiente de crescimento s_c ao longo do tempo para concretos produzidos com cimento tipo CP I, da marca B, para diferentes relações w/c	190
Figura 7.8	Valores do coeficiente de crescimento s_c ao longo do tempo para concretos produzidos com cimento tipo CP I, da marca C, para diferentes relações w/c	191
Figura 7.9	Envoltória das curvas de crescimento relativo da resistência à compressão, conforme pesquisa de Helene (1987)	194
Figura 7.10	Coeficiente s_c em função da relação água/cimento (w/c) para concretos produzidos com cimentos CP 25, CP 32, POZ 25, POZ 32, AF 25 e AF 32	196
Figura 7.11	Representação linear das curvas de crescimento da resistência do concreto. Estudo Battagin, Battagin e Munhóz (2010)	197
Figura 7.12	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão para diferentes tipos de cimento e relação água/cimento $w/c = 0,48$, em todos os casos	198
Figura 7.13	Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP III 40, $w/c = 0,50$, $f_{ck} = 35$ MPa	199
Figura 7.14	Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP III 40, $w/c = 0,45$, $f_{ck} = 40$ MPa	200
Figura 7.15	Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP III 40, $w/c = 0,40$, $f_{ck} = 45$ MPa	200
Figura 7.16	Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP V-ARI, $w/c = 0,45$, $f_{ck} = 40$ MPa	201
Figura 7.17	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão para diferentes tipos de cimento e relações água/cimento w/c . Obra A	202
Figura 7.18	Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP III 40, $w/c = 0,51$, $f_{ck} = 30$ MPa	203
Figura 7.19	Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP III 40, $w/c = 0,48$, $f_{ck} = 35$ MPa	204

Figura 7.20	Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP III 40, $w/c = 0,46$, $f_{ck} = 40$ MPa	204
Figura 7.21	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão para diferentes tipos de cimento e relações água/cimento w/c . Obra B	206
Figura 7.22	Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP II E - 40, classe de resistência C30, $w/c = 0,55$	207
Figura 7.23	Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP II E - 40, classe de resistência C40, $w/c = 0,45$	207
Figura 7.24	Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP II E - 40, classe de resistência C50, $w/c = 0,40$	208
Figura 7.25	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão para diferentes tipos de cimento e relações água/cimento w/c . Obra C	209
Figura 7.26	Coefficiente s_c em função da relação água/cimento (w/c) para concretos produzidos com cimentos CP II-40. Obra C	209
Figura 7.27	Representação linear da curva de crescimento da resistência do microconcreto de cimento Portland tipo CP V-ARI, classe de resistência C70	210
Figura 7.28	Curva de crescimento relativo da resistência para um microconcreto, classe de resistência C70. Obra D	211
Figura 7.29	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão para $0,35 \leq w/c \leq 0,65$ obtidas nesta dissertação e limites ABNT NBR 6118:2023 e <i>fib</i> Model Code 2020	213
Figura 7.30	Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão para $0,65 < w/c < 0,80$ obtidas nesta dissertação e limites ABNT NBR 6118:2023 e <i>fib</i> Model Code 2020	214
Figura 7.31	O efeito da carga mantida aplicada aos 28, 56, 91 e 365 dias de idade em curva de crescimento de coeficiente $s_c = 0,10$	216
Figura 7.32	O efeito da carga mantida aplicada aos 28, 56, 91 e 365 dias de idade em curva de crescimento de coeficiente $s_c = 0,64$	217

Lista de tabelas

Tabela 3.1	Abreviações dos principais compostos comumente adotadas na química do cimento Portland	48
Tabela 3.2	Teor limite dos principais compostos da matéria-prima utilizada na fabricação do cimento Portland	49
Tabela 3.3	Teor dos compostos do cimento Portland anidro	51
Tabela 3.4	Classificação dos poros quanto ao tamanho, em pastas de cimento Portland endurecida	66
Tabela 4.1	Volumes para compostos hidratados de cimento segundo o modelo de Powers para uma pasta produzida com 100 kg de cimento e relação $w/c = 0,5$, em massa	99
Tabela 4.2	Valores de referência dos coeficientes a e b . Modelo ACI 209	108
Tabela 4.3	Valores de referência para razão a/b . Modelo ACI 209	113
Tabela 4.4	Valores relativos de resistências obtidos a partir da Equação 2.17 proposta pelo ACI Committee 209, tendo como referência a resistência teórica aos $f_{c(28)}$	114
Tabela 4.5	Valores relativos de resistências obtidos a partir da Equação 4.31 proposta pelo ACI Committee 209, tendo como referência a resistência teórica na idade última $f_{c(\infty)}$	114
Tabela 4.6	Valores de referência para o coeficiente s_1 . Modelo GL2000	114
Tabela 4.7	Valores de referência para os coeficientes a e b . Modelo Gardner e Lockman	115
Tabela 4.8	Valores de referência para o coeficiente s . Modelo CEB-FIP Model Code 1990	116
Tabela 4.9	Valores de referência para o coeficiente s . Modelo <i>fib</i> Model Code 2010	117
Tabela 4.10	Valores de referência para o coeficiente s_c . Modelo <i>fib</i> Model Code 2020	122
Tabela 4.11	Valores de referência para o coeficiente s_c . Modelo Eurocode 2:2023	125
Tabela 4.12	Valores de referência para o coeficiente s . Modelo ABNT NBR 6118:2023	127
Tabela 4.13	Classificação dos concretos de acordo com o desenvolvimento da resistência à compressão a 20 °C	133
Tabela 4.14	Classificação dos concretos de acordo com o desenvolvimento da resistência à compressão em função do coeficiente s_c	133
Tabela 4.15	Modelos de comportamento, estudos teóricos e fatores intervenientes	150
Tabela 6.1	Exemplo da metodologia adotada, considerando apenas uma amostra coletada de um lote produzido com cimento tipo CP III – 40, $f_{ck} = 45$ MPa	174

Tabela 7.1	Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes s_c de Amaral Filho (1945)	183
Tabela 7.2	Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes s_c de Tango (1983)	188
Tabela 7.3	Resumo dos resultados obtidos por Helene (1987) para os coeficientes k_{11} e k_{12} das curvas de crescimento da resistência à compressão, conforme Equação 2.15	193
Tabela 7.4	Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes s_c das curvas de crescimento. Fonte histórica: Helene (1987)	193
Tabela 7.5	Crescimento relativo da resistência do concreto para os traços estudados	195
Tabela 7.6	Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes s_c das curvas de crescimento. Fonte histórica: Battagin, Battagin e Munhóz (2010)	197
Tabela 7.7	Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes s_c das curvas de crescimento. Fonte dados atuais: Obra A	201
Tabela 7.8	Obra A. Análise comparativa entre os coeficientes s_c obtidos e os coeficientes s_c preconizados pelo <i>fib</i> Model Code 2020	202
Tabela 7.9	Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes s_c das curvas de crescimento. Fonte dados atuais: Obra B	204
Tabela 7.10	Obra B. Análise comparativa entre os coeficientes s_c obtidos e os coeficientes s_c preconizados pelo <i>fib</i> Model Code 2020	205
Tabela 7.11	Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes s_c das curvas de crescimento. Fonte dados atuais: Obra C	208
Tabela 7.12	Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes de crescimento da resistência à compressão s_c , para concretos de $w/c \leq 0,65$. Ensaios laboratoriais	212
Tabela 7.13	Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes de crescimento da resistência à compressão s_c , para concretos de $w/c \leq 0,65$. Ensaios de campo	212
Tabela 7.14	Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes de crescimento da resistência à compressão s_c , para concretos de $w/c > 0,65$. Ensaios laboratoriais	214
Tabela 7.15	Coeficientes de crescimento s_c obtidos a partir da Equação 6.3 para 3 diferentes modelos teóricos	215
Tabela 7.16	Valores mínimos de α_{cc} para $t_{ref} = 28$ dias, t_0 variando de 28 a 365 dias e para diferentes coeficientes ($0,10 \leq s_c \leq 0,64$)	217

Lista de abreviaturas e siglas

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABECE	Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural
ABESC	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ALCONPAT	Associação Brasileira de Patologia das Construções
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEB	Comité Euro-International du Béton
CEN	Comité Européen de Normalisation
DEF	Delayed Ettringite Formation
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
EPD	Environmental Product Declaration
<i>fib</i>	Fédération Internationale du Béton
FIP	Fédération Internationale de la Précontrainte
GCCA	Global Cement and Concrete Association
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISA	Internal Sulphate Attack
LEM	Laboratório de Ensaios de Materiais
NBR	Norma Brasileira
NQCP	Núcleo de Qualificação e Certificação de Pessoal
PCA	Portland Cement Association
RBLE	Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UR	Umidade Relativa
USP	Universidade de São Paulo
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development

Lista de símbolos

α	grau de hidratação do cimento, $0 \leq \alpha \leq 1$
α_{cc}	coeficiente redutor da resistência de cálculo do concreto
α_p	grau de hidratação da partícula de cimento, $0 \leq \alpha_p \leq 1$
β	parâmetro de forma
β_e	símbolo utilizado no modelo GL2000 para representar o crescimento relativo da resistência à compressão do concreto
$\beta_{cc}(t)$	função que representa o crescimento relativo da resistência à compressão
$\beta_{c,sus}(t, t_0)$	função que representa o decréscimo da resistência à compressão devido a carga elevada de longa duração
$\beta_{t0}(t_0)$	parâmetro que considera a maturidade do concreto
γ_c	coeficiente de minoração da resistência característica do concreto ou coeficiente de ponderação
γ_f	coeficiente de majoração da ação característica
γ_m	coeficiente de minoração da resistência característica
Δt_i	número de dias nos quais a temperatura T prevalece
η_{fc}	coeficiente de fragilidade do concreto
a	constante utilizada no modelo ACI Committee 209, em dias
b	constante utilizada no modelo ACI Committee 209, adimensional
c	massa de cimento
c_v	volume absoluto de cimento por unidade de volume de argamassa
c_t	função utilizada por Rüsçh em 1960 que representa a diminuição da resistência ao longo do tempo em decorrência da carga mantida
E	energia de ativação, em J/mol
F_d	ação de projeto
F_k	ação característica
f_c	resistência à compressão
f_{cd}	resistência de cálculo à compressão do concreto
$f_{c(t)}$	resistência à compressão do concreto na idade t
$f_{c(t_{ref})}$	resistência à compressão na idade t_{ref}
f_{c0}	resistência à compressão do concreto com porosidade zero
$f_{c(7)}$	resistência à compressão do concreto aos 7 dias de idade
$f_{c(28)}$	resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade
$f_{c(\infty)}$	resistência à compressão última do concreto

f_{cm}	resistência média à compressão do concreto
$f_{cm,ef}$	resistência média à compressão do concreto real ou efetiva
f_{sk}	resistência característica do aço
f_k	resistência característica
f_d	resistência de projeto
f_{ck}	resistência característica à compressão do concreto
$f_{ck,est}$	resistência característica à compressão do concreto estimada
$f(r)$	função densidade de probabilidade
g	relação gel/espço
k	constantes
M	volume absoluto de agregado miúdo por unidade de volume de argamassa
m	massa
p	porosidade
p_0	porosidade na qual a resistência é praticamente nula
R	constante universal dos gases, igual a 8,314 J/mol.K
r	raio da partícula de cimento anidro
r_0	parâmetro proporcional a finura do cimento
r_d	parâmetro de escala
s	coeficiente adimensional que depende do tipo de cimento, pode variar de 0,2 a 0,38
s_1	coeficiente adimensional utilizado no modelo GL2000 que depende do tipo de cimento pode variar de 0,13 a 0,4
s_c	coeficiente adimensional que depende do tipo de cimento e da classe de resistência do concreto, pode variar de 0,1 a 0,6
s_d	desvio-padrão das resistências à compressão do concreto
$s_{d,ef}$	desvio-padrão efetivo das resistências à compressão do concreto
T	temperatura
T_0	temperatura de base, abaixo da qual não ocorre hidratação do cimento Portland
T_r	temperatura de referência
$T_{(\Delta t_i)}$	temperatura média em °C durante o intervalo de tempo Δt_i
t	idade ou tempo
t_e	tempo equivalente
t_h	tempo de hidratação
t_d	tempo de dormência

t_0	idade de carregamento do concreto
$(t - t_0)$	tempo de carga mantida
t_{nor}	período normal
t_{50}	tempo necessário para se atingir 50% da hidratação
t_{ref}	idade de controle e referência
$V_{\text{água combinada}}$	volume de água combinada
V_c	volume de cimento anidro
V_{cn}	volume de cimento não hidratado
$V_{\text{cimento hidratado}}$	volume de cimento hidratado
V_e	volume de capilares + volume de cimento hidratado
V_{gc}	volume de gel de cimento
V_p	volume de poros capilares
V_{pc}	volume de poros capilares vazios
V_{ps}	volume dos produtos sólidos de hidratação
V_{wc}	volume de água capilar
V_{wg}	volume de água de gel
v_v	volume absoluto de vazios por unidade de volume de argamassa
v_v/c_v	relação volume de vazios / volume de cimento
w	massa de água
w/c	relação água/cimento, em massa
w_v	volume absoluto de água por unidade de volume de argamassa
w_v/c_v	relação água/cimento, em volume
x	profundidade de hidratação, $0 \leq x \leq r$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	24
1.1 Justificativa e importância do tema	24
1.2 Objetivo	28
1.3 Conteúdo desta dissertação	28
 2 PESQUISADORES E CENTROS DE PESQUISA	 30
2.1 Do advento do cimento Portland até meados dos anos 1920: os primeiros 100 anos	30
2.2 De meados dos anos 1920 até os dias atuais: os últimos 100 anos	33
2.3 A evolução dos modelos teóricos representada na linha do tempo	43
 3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	 47
3.1 Composição química do cimento Portland anidro e sua hidratação	48
3.2 Finura do cimento	59
3.3 Relação água/cimento e porosidade	64
3.4 Grau de hidratação (α)	72
3.5 Temperatura do concreto	75
3.6 Influência da duração do carregamento	79
3.7 Considerações gerais sobre os fatores intervenientes na resistência à compressão	84
 4 MODELOS DE COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA	 85
4.1 Modelo de Féret	85
4.2 Modelo de Abrams	87
4.3 Modelo de Powers	92
4.4 Modelo ACI Committee 209	106
4.5 Modelos CEB-FIP Model Code 1990 e <i>fib</i> Model Code 2010	115
4.6 Modelo <i>fib</i> Model Code 2020	121
4.7 Modelo Eurocode 2:2023	124
4.8 Modelo ABNT NBR 6118:2023	126
4.9 O desenvolvimento da resistência à compressão do concreto e sua classificação de acordo com o valor teórico do coeficiente s_c	130

4.10 Análise comparativa entre os modelos propostos pelo ACI Committee 209 e <i>fib</i> Model Code 2020	134
4.11 Modelo da influência da temperatura interna do concreto no desenvolvimento da resistência à compressão	136
4.12 Modelo da influência da carga mantida	144
4.13 Resumo dos estudos e modelos de comportamento apresentados	149
5 MÉTODO DE INTRODUÇÃO DA SEGURANÇA NO PROJETO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO	151
5.1 Resistência de cálculo (f_{cd}) e coeficiente de ponderação (γ_c)	157
5.2 Coeficiente redutor da resistência de cálculo do concreto (α_{cc})	162
5.3 Coeficiente de fragilidade do concreto (η_{fc})	167
6 ESTUDO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA DE ANÁLISE	168
6.1 Fontes: histórica e de controle tecnológico	168
6.2 Metodologia de análise das curvas de crescimento da resistência	171
6.3 Metodologia de análise das curvas de decréscimo da resistência	179
6.4 Metodologia de análise do efeito combinado do crescimento e do decréscimo da resistência	180
7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	182
7.1 Fonte histórica: Epaminondas Melo do Amaral Filho (1939 a 1943)	182
7.2 Fonte histórica: Carlos Eduardo de Siqueira Tango (1957 a 1979)	186
7.3 Fonte histórica: Paulo Roberto do Lago Helene (1987)	192
7.4 Fonte histórica: Battagin, Battagin e Munhóz (2010)	196
7.5 Fonte atual: Obra A (2013 a 2016)	199
7.6 Fonte atual: Obra B (2017 a 2019)	203
7.7 Fonte atual: Obra C (2018 a 2020)	206
7.8 Fonte atual: Obra D (2015 a 2016)	210
7.9 Resumo e análise conjunta dos resultados	211
7.10 Análise do efeito combinado do crescimento e do decréscimo da resistência	215

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	219
8.1 Conclusões propriamente ditas	219
8.2 Sugestões à normalização nacional	221
8.3 Transferência do conhecimento ao meio técnico e científico	222
8.4 Continuidade de estudo do tema	223
REFERÊNCIAS	225
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	235

ANEXOS

Anexo A - Estudo de Amaral Filho (1945). Informações e dados de resistência à compressão do concreto
Anexo B - Estudo de Tango (1983). Informações e dados de resistência à compressão do concreto
Anexo C - Estudo de Helene (1987). Informações e dados de resistência à compressão
Anexo D - Estudo de Battagin, Battagin e Munhóz (2010). Informações e dados de resistência à compressão
Anexo E - Obra A (2013 - 2016). Informações e dados de resistência à compressão do concreto
Anexo F - Obra B (2017 - 2019). Informações e dados de resistência à compressão do concreto
Anexo G - Obra C (2018 - 2020). Informações e dados de resistência à compressão do concreto
Anexo H - Obra D (2015 - 2016). Informações e dados de resistência à compressão do microconcreto
Anexo I - Amaral Filho (1945). Representação linear das curvas de crescimento da resistência à compressão do concreto
Anexo J - Amaral Filho (1945). Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto
Anexo K - Tango (1983). Representação linear das curvas de crescimento da resistência à compressão do concreto
Anexo L - Tango (1983). Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto
Anexo M - Helene (1987). Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto
Anexo N - Battagin, Battagin e Munhóz (2010). Representação linear das curvas de crescimento da resistência à compressão

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e importância do tema

O concreto de cimento Portland é o material de construção civil mais utilizado no planeta. Trata-se de um material resistente, versátil, acessível, viável economicamente e que pode ser encontrado em praticamente todos os ambientes construídos, proporcionando segurança e conforto ao ser humano.

O ACI (2000)¹ define o concreto como um material compósito constituído essencialmente de um ligante com ou sem aditivos, no qual estão incorporadas partículas ou fragmentos de agregados, geralmente uma combinação de agregados miúdos e graúdos.

A esta definição, deve-se acrescentar o emprego de adições (inertes ou não), que quase sempre são incorporadas à mistura. Sendo assim, simplificadamente, pode-se dizer que concreto de cimento Portland é um material constituído por: cimento Portland, água, agregados, aditivos e adições.

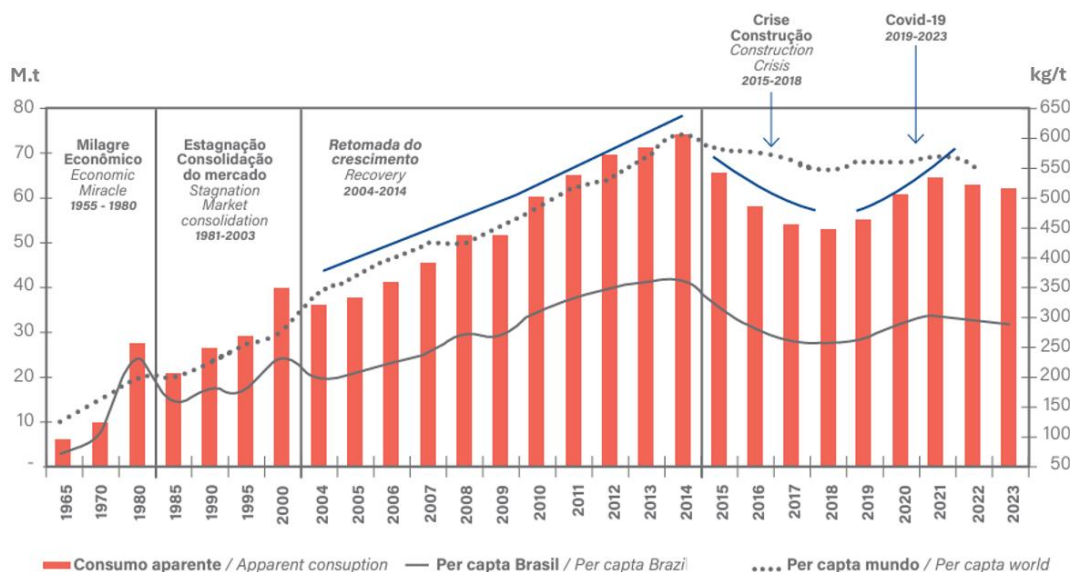
Segundo dados do relatório anual do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2024)², o Brasil, no ano de 2022, foi o 6º maior consumidor de cimento Portland do mundo, atrás da China, Índia, Estados Unidos, Vietnã e Indonésia, nessa ordem, e seguido por Rússia, Irã, Turquia, Egito, Arábia Saudita, Coreia do Sul, Paquistão e México.

A Figura 1.1 apresenta graficamente a evolução do consumo de cimento no Brasil e no mundo, entre os anos de 1965 e 2023. Observa-se na referida figura que, no ano de 2023, o consumo de cimento no Brasil foi de 62,2 milhões de toneladas, o que corresponde a um consumo *per capita* da ordem de 300 kg/hab. Nota-se também que durante o período de retomada do crescimento no país, compreendido entre os anos de 2004 e 2014, o consumo de cimento duplicou, registrando o recorde histórico nacional de 71,7 milhões de toneladas no ano de 2014.

¹ AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 116R-00**: Cement and Concrete Terminology. Farmington Hills: ACI, 2000. 73 p.

² SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório Anual 2023**. 2024. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-relatorio-anual.php>. Acesso em: 11 dez. 2024.

Figura 1.1 - Evolução do consumo de cimento no Brasil e no mundo.



Fonte: SNIC (2024), p. 16.

Conforme resultado de estudos do encadeamento da indústria do cimento no Brasil, realizado pelo SNIC, para cada milhão de tonelada de cimento produzido são gerados cerca de 1.200 empregos (diretos, indiretos e induzidos) o que corresponde a aproximadamente R\$ 480 milhões de reais em geração de valor e arrecadação ao redor de R\$ 55,4 milhões em impostos (GUIMARÃES, 2022)³.

Ainda, conforme pesquisa realizada pela *CW Research* publicada no SNIC (2024) o preço médio do cimento no Brasil, no ano de 2023 foi de 70 dólares por tonelada (70 US\$/t), contra o preço médio na Índia de 65 US\$/t e de 170 US\$/t nos Estados Unidos, correspondentes aos preços mínimo e máximo.

Apesar do Brasil estar classificado como o 6º maior mercado consumidor de cimento no mundo, o consumo *per capita* no país ainda é da ordem de 60% do consumo *per capita* mundial, o que significa que há muito por construir e investir na infraestrutura nacional.

Há de se considerar também as questões ambientais relacionadas com a sustentabilidade, aquecimento global e emissões de gases do efeito estufa oriundas da indústria cimenteira. De acordo com o *World Business Council for Sustainable*

³ GUIMARÃES, Flávio. **O encadeamento da indústria do cimento no Brasil**. 2022. ABCP. Disponível em: <https://abcp.org.br/o-encadeamento-da-industria-do-cimento-no-brasil-2/>. Acesso em: 20 set. 2024.

Development – WBCSD (CEMENT... 2009)⁴ as emissões da indústria do cimento em nível mundial são estimadas em cerca de 5% do total das emissões antrópicas de CO₂.

Ainda, conforme declaração ambiental de produto aprovada por comitê técnico da *International EPD System* EPD (2016)⁵, registra-se que as emissões de gás carbônico por tonelada de cimento produzido no Brasil variam entre 587 kgCO₂ e 906 kgCO₂, dependendo do tipo de cimento.

No entanto, é necessário registrar que de acordo com o *Global Cement and Concrete Association* – GCCA, o Brasil se posiciona como um dos países com a menor emissão de carbono por tonelada de cimento produzido, tendo estado a frente desse indicador por mais de 20 dos cerca de 30 anos de série histórica, sendo que entre os anos de 1990 e 2022, o setor conseguiu reduzir em 17% suas emissões de carbono (SNIC, 2024).

Sendo o concreto o principal produto derivado do cimento Portland, este poderia contribuir muito com a redução da emissão de CO₂, sobretudo se analisarmos sua propriedade líder que é a resistência à compressão. Esta, se especificada em projeto para controle em idades mais avançadas, além dos tradicionais 28 dias, permitiria a diminuição do consumo de cimento no traço e, portanto, a redução da liberação de CO₂ na atmosfera. Neste contexto, conhecer o comportamento da resistência à compressão ao longo da vida útil de uma estrutura de concreto se faz necessário e oportuno, também por razões ambientais.

Sabe-se que a resistência à compressão do concreto aumenta com o passar do tempo em decorrência das reações químicas de hidratação do cimento Portland presente na mistura. A dinâmica dessas reações e, conseqüentemente, a taxa de crescimento da resistência à compressão ou seu grau de hidratação variam, basicamente, de acordo com as características e proporções dos insumos utilizados (traço do concreto), da natureza do cimento, sua composição química, finura, da homogeneização do concreto, das condições de umidade relativa, temperatura de

⁴ CEMENT Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050. Carbon emissions reductions up to 2050. 2010. World Business Council for Sustainable Development. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/cement-technology-roadmap-carbon-emissions-reductions-up-to-2050>. Acesso em: 19 set. 2024.

⁵ EPD: DECLARAÇÃO CLIMÁTICA PARA O CIMENTO. 2016. Disponível em: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/5d379720-4109-4bdc-b9b1-c3369dfd968a/Data>. Acesso em: 27 abr. 2024.

cura e exposição ao longo da vida útil, da presença de aditivos, adições e outras influências menores, resultando em diferentes curvas de crescimento da resistência à compressão em função do tempo.

O conhecimento dessas curvas de comportamento no tempo, exerce um papel importante no projeto e na execução das estruturas de concreto. Na prática, a verificação da segurança no projeto estrutural, os serviços de retirada de fôrmas, escoramentos, protensão da estrutura, enfim as etapas construtivas estão intimamente relacionadas com o desenvolvimento e com o aumento da resistência desse material ao longo do tempo.

Neste contexto, modelos de comportamento que possibilitem estimar previamente a resistência à compressão do concreto em qualquer idade, são fundamentais para o projeto estrutural que tem a responsabilidade de admitir uma resistência “mínima” e confiável ao longo de uma vida útil de 50 anos ou mais, além de que auxiliam sobremaneira a dinâmica da execução das obras, a tomada de decisões e o planejamento de estruturas de concreto armado e protendido.

No que se refere aos conceitos teóricos, esses modelos de crescimento da resistência do concreto também são fundamentais, na medida que, em parte, são responsáveis pela determinação da segurança a ser introduzida no projeto estrutural.

Por outro lado, assim como a resistência do concreto cresce com a idade devido à hidratação do cimento, ela também pode decrescer, caso este concreto esteja sob tensões elevadas de compressão, devido ao fenômeno da relaxação conhecido por efeito das cargas mantidas ou de longa duração, também denominado no país por efeito Rüsç (HELENE, 1998)⁶.

Esta dissertação contribui com o entendimento da variação da resistência à compressão do concreto ao longo da sua vida útil, considerando as ações do meio ambiente, a influência das características dos insumos e da idade de aplicação das cargas na estrutura (efeito Rüsç), com o foco de que o avanço do conhecimento neste tema pode permitir adequações dos critérios de verificação da segurança e contribuir para as questões ambientais relacionadas com a diminuição do consumo de cimento, obtendo-se concretos mais econômicos e sustentáveis.

⁶ HELENE, Paulo R. L.. Concreto de Elevado Desempenho: o material para construção das obras no ano 2000. **Engenharia e Construção**: Luso Brasileira, Curitiba, n. 18, p. 11-13, mar. 1998. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/1998/06/concreto-elevado.compressed.pdf>. Acesso em: 16 maio 2025.

1.2 Objetivo

Estudar o comportamento dos principais modelos teóricos usados desde a década de 1890 para representar o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto, entre eles o modelo de Féret, modelo de Abrams, modelo de Powers, modelo ACI Committee 209, modelo *fib* Model Code 2020, incluindo o modelo de Hubert Rüsch que representa o efeito das cargas elevadas e de longa duração na resistência do concreto.

Comparar as curvas de crescimento de resistência obtidas a partir de resultados experimentais com as curvas teóricas preconizadas em normas e códigos modelo atualmente em vigor, reconhecidos nacional e internacionalmente.

Fomentar a discussão sobre o valor a ser adotado como resistência de projeto, incluindo o coeficiente redutor da resistência de cálculo do concreto (α_{cc}) do *fib* Model Code 2020 (equivalente ao $0,85 * f_{cd}$ da norma ABNT NBR 6118) empregado na avaliação de seções comprimidas de concreto estrutural e, em geral, associado ao desenvolvimento das curvas de resistência à compressão sob carga mantida (efeito Rüsch).

1.3 Conteúdo desta dissertação

Esta dissertação está dividida em 8 capítulos. Inicialmente, neste Capítulo 1, apresenta-se a justificativa, a importância do tema e os objetivos desta dissertação.

No Capítulo 2, são apresentadas as principais expressões utilizadas na determinação da resistência à compressão do concreto e um histórico da evolução do estudo sobre o tema, enfatizando os pesquisadores e centros de pesquisa envolvidos desde os anos 1892, inclusive no Brasil.

No Capítulo 3, explica-se sucintamente, para melhor entendimento dos modelos teóricos estudados, a influência dos parâmetros intervenientes relacionados com a resistência à compressão do concreto, são eles: composição química do cimento Portland, sua finura, relação água/cimento (w/c), porosidade, grau de hidratação, temperatura e a influência da carga elevada e mantida.

Na sequência, no Capítulo 4, apresenta-se detalhadamente as particularidades e condições de contorno dos seguintes modelos teóricos a saber: modelo de Féret,

modelo de Abrams, modelo de Powers, modelo ACI Committee 209, modelo CEB-FIP Model Code 1990, modelo *fib* Model Code 2010, modelo *fib* Model Code 2020, modelo Eurocode 2:2023 e modelo ABNT NBR 6118:2023. Além disso, realiza-se uma análise comparativa entre os dois principais modelos utilizados na atualidade, o modelo ACI Committee 209 e o *fib* Model Code 2020. O capítulo se encerra com o estudo dos modelos que retratam a influência da temperatura e da carga mantida no desenvolvimento da resistência à compressão do concreto.

No Capítulo 5 aborda-se o método de introdução da segurança estrutural, são estudados os coeficientes de ponderação (γ_c), de fragilidade (η_{fc}) e redutor de resistência de cálculo (α_{cc}). Este último é analisado com mais profundidade, uma vez que está intimamente relacionado com as expressões de crescimento ($\beta_{cc}(t)$) e decréscimo ($\beta_{c,sus}(t, t_0)$) da resistência à compressão do concreto. Compara-se o resultado do produto das funções $\beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0)$ com o valor do coeficiente redutor da resistência de cálculo do concreto proposto pelo *fib* Model Code 2020 (α_{cc}). Aborda-se também os conceitos de resistências característica à compressão (f_{ck}) e de projeto a ele associado (f_{cd}).

No Capítulo 6 inicia-se o estudo experimental. No referido capítulo são apresentados os resultados de resistência à compressão de diferentes traços de concreto produzidos no Brasil desde o final da década de 1930 até os dias atuais, bem como a metodologia de análise empregada para confrontá-los com os resultados teóricos obtidos por meio do modelo de crescimento da resistência à compressão proposto pelo *fib* Model Code for Concrete Structures 2020. Apresenta-se também as justificativas da escolha deste modelo, dentre todos os analisados nesta dissertação.

No Capítulo 7 são discutidos os resultados obtidos. Apresenta-se graficamente as correlações entre os coeficientes de crescimento e relações w/c , compara-se os resultados obtidos com os valores teóricos preconizados, faz-se uma análise das variações obtidas ao longo do tempo, uma vez que os dados analisados contemplam resultados obtidos desde a década de 1930. Os resultados obtidos também são analisados considerando os efeitos da carga mantida.

No Capítulo 8 são apresentadas as considerações finais e as conclusões. Abordam-se sugestões para o avanço da normalização nacional e para a continuidade do estudo sobre o tema.

2 PESQUISADORES E CENTROS DE PESQUISA

Neste capítulo estão apresentados os pesquisadores e os centros de pesquisa envolvidos com estudos e com o desenvolvimento de modelos de comportamento da resistência à compressão do concreto, desde o advento do cimento Portland até os dias atuais. É interessante notar a continua evolução e as relações que se desencadearam ao longo dos anos entre os modelos teóricos.

De maneira a facilitar a leitura, o entendimento e a organização do texto, optou-se por apresentá-los cronologicamente, de acordo com sua publicação.

2.1 Do advento do cimento Portland até meados dos anos 1920: os primeiros 100 anos

Em 1812, Louis Vicat, engenheiro francês recém-graduado na “*École Nationale des Ponts et Chaussées*”, foi enviado para a cidade de Souillac, no sudoeste da França, para coordenar a construção de uma ponte sobre o Rio Dordogne. Durante a execução desta obra ele desenvolveu o interesse pelo estudo de aglomerantes hidráulicos e constatou que o endurecimento deste material é dependente das proporções de argila e calcário que ele contém. Em 1818, os resultados deste estudo, finalizado um ano antes, foram apresentados à “*Académie des Sciences de France*” que validou sua descoberta. Surgia o cimento artificial. Entretanto, Vicat optou por não registrar uma patente, considerando que devia seu conhecimento acadêmico e científico à comunidade francesa em geral (THE... 2025)⁷.

Seis anos mais tarde, em outubro de 1824, na Inglaterra, foi patenteado o processo de produção do cimento Portland. A patente n. 5022, intitulada “*Aspdin’s Improvements in the Modes of Producing an Artificial Stone*” foi registrada por Joseph Aspdin, construtor na cidade de Leeds (ASPDIN, 1824)⁸. Desde então o processo de

⁷ THE history of Louis Vicat. Disponível em: <https://www.vicat.com/about-us/vision/history-of-louis-vicat>. Acesso em: 08 jan. 2025.

⁸ ASPDIN, Joseph. **Artificial Stone**.. UK n. 5022. Depósito: out. 1824. Concessão: dez. 1824.

produção foi continuamente aperfeiçoado e o cimento Portland se tornou o principal insumo dos materiais cimentícios: pastas, argamassas e concretos.

Tendo em vista a notável e crescente importância de um produto barato, produzido em grandes volumes e disponível em todos os países por utilizar matérias-primas abundantes na crosta terrestre (calcário e argila), a humanidade se deu conta de sua importância potencial e inúmeros estudos foram realizados por pesquisadores em diversos centros de pesquisa, em todo o mundo.

Estes estudos, que também se estenderam às pastas, argamassas e concretos, permitiram o emprego destes produtos em diversas áreas da construção civil, tornando o concreto de cimento Portland o produto mais consumido atualmente pela humanidade, depois da água.

Esta pesquisa de dissertação se concentra nos estudos relacionados com as propriedades mecânicas do material, com ênfase nas expressões teóricas que visam representar o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto, sua principal propriedade mecânica.

Em 1892, ou seja, exatamente 68 anos depois do registro da patente do cimento Portland, René Féret, diretor do Laboratório de “*Ponts et Chaussées de Boulogne sur Mer*”, na França, propôs um modelo matemático para a determinação teórica da resistência de argamassas de cimento (HELENE; TERZIAN, 1992)⁹.

De acordo com Petrucci (1968)¹⁰, trata-se do mais antigo de todos os modelos que correlacionam a resistência à compressão axial com a composição do traço de materiais utilizados.

O modelo proposto por Féret, já embutia o conhecimento de que a quantidade de água em relação ao volume de cimento empregado, tinha forte influência na resistência mecânica dos concretos e argamassas. O modelo correlacionou a resistência à compressão de argamassas com o volume absoluto de cimento, a quantidade de água e o volume de vazios, da seguinte forma:

$$f_c = k_1 * \left(\frac{c_v}{c_v + w_v + v_v} \right)^2 \quad (2.1)^{11}$$

⁹ HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Pini, 1992. 349 p.

¹⁰ PETRUCCI, Eládio. G.. **Concreto de Cimento Portland**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1968. 198 p.

¹¹ Esta expressão é estudada detalhadamente no subitem 4.1 “*Modelo de Féret*” desta dissertação.

Onde:

f_c : resistência à compressão;

c_v : volume absoluto de cimento por unidade de volume de argamassa;

w_v : volume absoluto de água por unidade de volume de argamassa;

v_v : volume absoluto de vazios por unidade de volume de argamassa;

k_1 : constante que depende da natureza dos materiais, da idade e das condições de cura.

Desde então, diversos modelos teóricos foram estudados e propostos, de maneira a representar o comportamento da resistência à compressão de pastas, argamassas e concretos.

Abrams (1919)¹², pesquisador americano, em trabalho denominado “*Design of Concrete Mixtures*” comprovou por meio de estudos de diferentes traços de concretos plásticos e ensaios de milhares de corpos de prova que a resistência mecânica à compressão do concreto varia inversamente com a relação água/cimento:

$$f_c = \frac{k_2}{k_3^{w_v/c_v}} \quad (2.2)^{13}$$

Onde:

f_c : resistência à compressão;

w_v/c_v : relação água/cimento, em volume;

k_2 e k_3 : constantes que dependem dos materiais, idade e condições de cura.

Para Neville (2016)¹⁴, os modelos propostos por René Féret e por Duff Abrams, apesar de estabelecidos separadamente, são similares na medida que consideram que a resistência do concreto é função das quantidades de água e cimento.

Convém registrar que outros modelos que relacionam a resistência à compressão com a relação água/cimento foram propostos por outros pesquisadores

¹² ABRAMS, Duff A.. Design of Concrete Mixtures. **Structural Materials Research Laboratory Lewis Institute**, Chicago, v. 1, n. 1, p. 1-20, maio 1919.

¹³ Esta expressão é estudada detalhadamente no subitem 4.2 “*Modelo de Abrams*” desta dissertação.

¹⁴ NEVILLE, A. M.. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

no mesmo período. Petrucci (1968) menciona como exemplo o modelo proposto por J. Bolomey, Professor em Lausanne, Suíça, em 1925, que considera:

$$f_c = k_4 * \left[\frac{1}{w/c} - 0,5 \right] \quad (2.3)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão, em MPa;

w/c : relação água/cimento, em massa;

k_4 : constante que varia de acordo com a idade e com as características dos materiais da época, podendo assumir os seguintes valores médios: para 7 dias, $k_4 = 12,5$ MPa; para 28 dias, $k_4 = 19,0$ MPa; para 91 dias, $k_4 = 23,0$ MPa. Observa-se que o modelo considera que a resistência à compressão (f_c) é nula para uma relação $w/c = 2$, para qualquer valor de k_4 .

2.2 De meados dos anos 1920 até os dias atuais: os últimos 100 anos

Em março de 1947, Powers e Brownyard, pesquisadores americanos, em estudo denominado “*Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste*” publicado na Revista do American Concrete Institute - ACI notaram que a porosidade da pasta de cimento endurecida é o principal parâmetro relacionado com a resistência à compressão (POWERS; BROWNYARD, 1947)¹⁵. Desta maneira concluíram que a resistência à compressão do concreto também pode ser determinada por meio de uma relação denominada gel/espaco da seguinte maneira:

$$f_c = k_5 * g^{k_6} \quad (2.4)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão;

k_5 : coeficiente que representa a resistência do concreto hidratado.

k_6 : coeficiente adimensional.

g : relação gel/espaco, dada por:

¹⁵ POWERS, T. C.; BROWNYARD, T. L.. Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste: relation of physical characteristics of the paste to compressive strength. **Journal Of The American Concrete Institute**, Detroit, v. 18, n. 7, p. 845-992, mar. 1947.

$$g = \frac{0,68 \cdot \alpha}{0,32 \cdot \alpha + \frac{w}{c}} \quad (2.5)^{16}$$

α : grau de hidratação do cimento, varia de $0 \leq \alpha \leq 1$;

w/c : relação água/cimento, em massa.

A formulação supra apresentada deriva de estudos da microestrutura das pastas de cimento e foi reconhecida como um dos mais precisos modelos sendo conhecido atualmente por modelo de Powers.

De acordo com Powers (1966)¹⁷ a resistência à compressão do concreto tende a ser estabelecida pela densidade da matriz, desde que os agregados apresentem resistência superiores a da pasta. A densidade da matriz, por sua vez, pode ser determinada por meio da relação gel/espaco, obtida por meio da razão entre o volume dos produtos de hidratação do cimento e o espaco total disponível no sistema, sendo que este último corresponde ao volume ocupado pelo cimento anidro mais o volume ocupado pela água da mistura.

Após a conclusão de Powers de que a porosidade (p) é o principal parâmetro relacionado com a resistência à compressão, outros modelos que correlacionam a porosidade com a resistência de pastas, argamassas e concretos foram propostos.

Coutinho (2006)¹⁸ e Taylor (1997)¹⁹ citam cronologicamente alguns deles:

a) Modelo de M. Y. Balshin, pesquisador russo, proposto em 1949:

$$f_c = f_{c0} * (1 - p)^{k_7} \quad (2.6)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão com porosidade p ;

f_{c0} : resistência à compressão com porosidade zero ($p = 0$);

k_7 : parâmetro experimental, adimensional;

p : porosidade.

¹⁶ A dedução desta equação está apresentada no subitem 4.3 “Modelo de Powers” desta dissertação.

¹⁷ POWERS, T. C.. The Nature of Concrete. STP – Special Technical Publication. **American Society for Testing and Materials**, Skokie, v. 169-A, p. 61-72, jan. 1966.

¹⁸ COUTINHO, A. de Souza. **FABRICO E PROPRIEDADES DO BETÃO**: volume i. 4. ed. Lisboa: L nec, 2006. 401 p.

¹⁹ TAYLOR, H. F. W.. **Cement chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997. 459 p.

b) Modelo de Eugene Ryshkewitch, pesquisador alemão, proposto em 1953:

$$f_c = f_{c0} * e^{-k_8 p} \quad (2.7)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão com porosidade p ;

f_{c0} : resistência à compressão com porosidade zero ($p = 0$);

k_8 : constante que depende do material, adimensional;

p : porosidade.

Registra-se que este modelo de Ryshkewitch também é mencionado por Mehta e Monteiro (2014)²⁰ como a relação fundamental entre porosidade e resistência dos sólidos para materiais homogêneos simples e seu estudo será retomado futuramente nesta dissertação²¹.

c) Modelo de Didericus P. H. Hasselmann, pesquisador americano, Professor da Universidade Virginia Tech, proposto em 1962:

$$f_c = f_{c0} * (1 - k_9 * p) \quad (2.8)$$

Onde:

f_c : resistência do material com porosidade p ;

f_{c0} : resistência intrínseca sob porosidade zero;

k_9 : constante que depende do material, adimensional;

p : porosidade.

d) Modelo de K. K. Schiller, pesquisador inglês, proposto em 1971 (SCHILLER, 1971)²²:

$$f_c = k_{10} * \ln \frac{p_0}{p} \quad (2.9)$$

Onde:

f_c : resistência do material com porosidade p ;

p_0 : porosidade na qual a resistência é praticamente nula;

²⁰ MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.

²¹ Conforme detalhado no subitem 3.3 “*Relação água/cimento e porosidade*” desta dissertação.

²² SCHILLER, K.K.. Strength of porous materials. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 1, n. 4, p. 419-422, jul. 1971. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(71\)90035-4](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(71)90035-4).

k_{10} : parâmetro experimental;

p : porosidade.

Vale registrar a semelhança observada entre o modelo proposto por Powers em 1947 (Equação 2.4) e por Balshin em 1949 (Equação 2.6). Este último foi obtido a partir das premissas admitidas por Powers e, portanto, trata-se de uma variação do primeiro, considerando $k_5 = f_{c0}$ e $k_6 = k_7$, já que a relação gel/espaco (g) representa a quantidade de fração sólida no sistema, ou seja, $g = 1 - p$, onde p é a porosidade.

Ainda, de acordo com Coutinho (2006) o modelo proposto por Ryshkewitch (Equação 2.7) mostra boa correlação com baixas porosidades e o de Schiller (Equação 2.9) com porosidades mais elevadas.

Nota-se que, dentre todos os modelos mencionados até o momento, nenhum estabelece uma relação direta e explícita da evolução da resistência à compressão (de pastas, argamassas ou concretos de cimento Portland) em função do tempo. Dentre eles, apenas o modelo de Powers considera essa variável de forma implícita, por meio do grau de hidratação do cimento Portland (α), sendo que este, a 28 dias de idade, de acordo com Levy e Helene (1996)²³ em condições normais de temperatura (em torno de 23°C) e elevada umidade relativa (UR superior a 98%) pode ser de 65% a 75%, podendo-se admitir por aproximação que alcançará 100% somente aos 50 anos de idade. Para relações w/c muito baixas, ou concretos mantidos em ambientes secos, a hidratação completa nunca será alcançada.

Entretanto, é imperativo salientar que o grau de hidratação (α), não possui uma relação linear com a idade, pois a hidratação do cimento Portland ocorre em uma taxa muito mais acelerada nas primeiras idades, quando comparada a idades mais avançadas. Portanto, estabelecer uma relação entre o grau de hidratação do cimento (α) e a idade do concreto, não é uma tarefa simples, pois depende de inúmeros fatores, tais como: características físicas e químicas do material, finura do cimento, temperatura de cura, disponibilidade de água para hidratação do cimento anidro, relação w/c do traço, condições ambientais e outras.

Vale registrar que em diversos tipos de análises e verificações estruturais faz-se necessário o conhecimento prévio da resistência à compressão do concreto em

²³ LEVY, Salomon; HELENE, Paulo. Cura: como, quando e por quê. *Téchne*, São Paulo, v. 4, n. 20, p. 18-21, jan. 1996.

idades pré-estabelecidas. Daí a importância de se conhecer curvas mais precisas de crescimento da resistência em função do tempo. Nesse contexto, outros modelos foram desenvolvidos.

Estudos pioneiros neste sentido foram realizados por Slater (1926)²⁴, pesquisador americano, que estabeleceu uma relação entre a resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade, para concretos produzidos com diferentes relações água/cimento ($0,66 \leq w/c \leq 1,46$), da seguinte maneira:

$$f_{c(28)} = f_{c(7)} + 30 * \sqrt{f_{c(7)}} \quad (2.10)$$

Onde:

$f_{c(28)}$: resistência à compressão aos 28 dias de idade, em lb/in²;

$f_{c(7)}$: resistência à compressão aos 7 dias de idade, em lb/in².

Evidentemente essa formulação, e suas limitações, ficam restritas aos materiais disponíveis na época do estudo, publicado em janeiro de 1926 pelo engenheiro americano W. A. Slater, pesquisador do “*National Bureau of Standards*” de Washington, D. C.

No Brasil, Petrucci (1968), também estabeleceu relações empíricas entre as resistências à compressão em diferentes idades, por meio de ensaios de ruptura de corpos de prova de concretos produzidos com cimento Portland comum, na época CP Classe 250 (cimento com resistência à compressão correspondente ao quantil inferior de uma função erro de Gauss de 250 kgf/cm² aos 28 dias). Segundo os estudos da época, final da década de 1960, foram estabelecidas as seguintes relações: $f_{c(28)} = (1,30 \text{ a } 1,50) * f_{c(7)}$; $f_{c(7)} = (1,40 \text{ a } 1,60) * f_{c(3)}$; $f_{c(28)} = (1,80 \text{ a } 2,50) * f_{c(3)}$; $f_{c(90)} = (1,05 \text{ a } 1,20) * f_{c(28)}$ e $f_{c(365)} = (1,10 \text{ a } 1,35) * f_{c(28)}$. Observa-se que Petrucci já previa, na época, que a resistência à compressão a um ano de idade poderia crescer de 10% a 35% em relação à resistência de 28 dias.

²⁴ SLATER, W. A.. Relation of 7-Day to 28-Day Compressive Strength of Mortar and Concrete. **Aci Journal Proceedings**, Washington, Dc, v. 22, n. 2, p. 437-449, 1926. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/15616>.

Ressalta-se que, estudos dessa natureza já haviam sido realizados antes aqui no Brasil, no ano de 1944 em São Paulo, pelo Eng. Epaminondas Melo do Amaral Filho²⁵, na época pesquisador do IPT (BAUER, BIRINDELLI e DAMINELI, 2025)²⁶.

Entretanto, o estudo mais relevante realizado no país sobre o tema, foi o programa experimental intitulado “*Estudo de dosagem de concreto de longa duração*” que teve início no ano de 1933, coordenado pelo Eng. Ary Torres do Laboratório de Ensaio de Materiais – LEM, atualmente denominado Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT. As moldagens dos corpos de prova do referido estudo foram realizadas durante 32 anos (de 1933 a 1965) e, no total foram analisados concretos produzidos com 75 diferentes amostras de cimento em diferentes traços (QUARCIONI *et al.*, 2020)²⁷.

Como registro histórico, convém mencionar outro modelo teórico, considerado pela norma ABNT NBR 7197:1989 “*Projeto de estruturas de concreto protendido*”, cancelada em 31/03/2004, em seu item 7 “*Fluência, retração e relaxação*” (ABNT, 1989)²⁸. Esta norma apresentava uma expressão para o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto em função da idade (t):

$$f_{c(t)} = \frac{9 \cdot t \cdot (t + 42)}{(9 \cdot t + 40) \cdot (t + 61)} * f_{c(\infty)} \quad (2.11)$$

Onde:

$f_{c(t)}$: resistência à compressão do concreto na idade t , em MPa;

t : idade, em dias;

$f_{c(\infty)}$: resistência à compressão do concreto, no fim da vida útil, sem ter sido submetido a cargas, em MPa.

²⁵ Os resultados deste estudo estão apresentados no Anexo A e foram analisados detalhadamente, como consta no subitem 7.1 “*Fonte histórica: Epaminondas Melo do Amaral Filho (1939 a 1945)*” desta dissertação.

²⁶ BAUER, Luiz Alfredo Falcão; BIRINDELLI, Lucy I. Olivan; DAMINELI, Bruno Luís. ENSAIOS ACELERADOS PARA PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO. In: BAUER, L. A. Falcão. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2025. Cap. 12. p. 272-288.

²⁷ QUARCIONI, Valdecir Angelo *et al.* Estudo IPT de concreto com idades avançadas: histórico e aspectos gerais. **Concreto & Construções**, São Paulo, v. 47, n. 97, p. 52-60, jan. 2020. Trimestral. IBRACON.

²⁸ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7197**: Projeto de estruturas de concreto protendido. Rio de Janeiro: Abnt, 1989. 71 p.

Nota-se que a expressão proposta pela antiga norma brasileira de projeto de estruturas de concreto protendido era bastante simplificada, pois não considerava nenhum outro parâmetro, além do tempo (t). Por exemplo, não era levado em consideração o tipo de cimento ou cura utilizados.

No cenário mundial outras expressões matemáticas foram propostas na mesma época. Dentre elas, pode-se citar a expressão apresentada em Jerath e Kabbani (1983)²⁹, obtida por regressão utilizando ferramenta computacional, a partir de resultados de resistência de concretos com relação água/cimento variando de $0,4 \leq w/c \leq 0,8$, sendo:

$$f_{c(t)} = 0,192 * f_{c(28)}^{1,05} * t^{0,43} \quad (R^2 = 0,87) \quad (2.12)$$

Onde:

$f_{c(t)}$: resistência à compressão do concreto na idade t , em MPa;

t : idade, em dias;

$f_{c(28)}$: resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, em MPa.

Observa-se que para uma idade $t = 7$ dias, a expressão de Sukhvarsh Jerath e Isam A. Kabbani (Equação 2.12) assume o seguinte formato: $f_{c(28)} = 2,17 * f_{c(7)}^{0,95}$, com $f_{c(28)}$ e $f_{c(7)}$ em MPa.

O formato supracitado é equivalente ao modelo mencionado por Shetty e Jain (2024)³⁰ indicado na Equação 2.13 e apresentado em literatura indiana publicada inicialmente no ano de 1982.

$$f_{c(28)} = k_a * f_{c(7)}^{k_b} \quad (2.13)^{31}$$

Onde:

$f_{c(28)}$: resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, em MPa;

$f_{c(7)}$: resistência à compressão do concreto aos 7 dias de idade, em MPa;

k_a e k_b : constantes que dependem dos materiais utilizados e da temperatura.

²⁹ JERATH, Sukhvarsh; KABBANI, Isam A.. Computer-Aided Concrete Mix Proportioning. **Aci Journal Proceedings**, [S.L.], v. 80, n. 4, p. 312-317, jul. 1983. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/10854>.

³⁰ SHETTY, M. S.; JAIN, A. K.. **Concrete Technology**: theory and practice. 8. ed. New Delhi: S. Chand, 2024. 636 p.

³¹ Notar-se-á que a Equação 2.13 se trata de um caso particular das Equações 2.16 e 4.8, deduzidas a partir do modelo de Abrams.

Na França, ainda na década de 1980, o “*Ministère de L’Urbanisme et du Logement*” publicou um caderno técnico de obras públicas denominado “*Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états-limites*”, mais conhecido por Règles B.A.E.L 83 (FRANCE, 1983)³². Este documento, em seu subitem A.2.11.1 “*Résistance du béton*” admitia que a resistência à compressão do concreto nas primeiras idades (até os 28 dias) poderia ser estimada da seguinte maneira:

$$f_{c(t)} = 0,685 * f_{c(28)} * lg (t + 1) \quad (2.14)$$

Onde:

$f_{c(t)}$: resistência à compressão do concreto na idade t , em MPa;

t : idade, em dias, com $t \leq 28$ dias;

$f_{c(28)}$: resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, em MPa.

Também na década de 1980, menciona-se os relevantes estudos realizados no Brasil por Helene (1987)³³, Professor titular do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da USP que ao estudar o desenvolvimento da resistência de concretos produzidos com diversos tipos de cimento da época utilizou a expressão:

$$f_{c(t)} = \frac{k_{11}}{k_{12}^{1/\sqrt{t}}} * f_{c(28)} \quad (2.15)^{34}$$

Onde:

$f_{c(t)}$: resistência à compressão do concreto na idade t , em MPa;

t : idade, em dias;

$f_{c(28)}$: resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, em MPa.

k_{11} e k_{12} : constantes que dependem dos materiais utilizados.

³² FRANCE. Cahier Des Clauses Techniques Générales n° BAEL 83, de 7 de outubro de 1983. **Règles Techniques de Conception Et de Calcul Des Ouvrages Et Constructions em Béton Armé Suivant La Méthode Des États-Limites**. Paris.

³³ HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para dosagem e controle dos concretos de cimento Portland**. 1987. 278 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

³⁴ A análise desta equação está apresentada no subitem 6.2 “*Metodologia de análise das curvas de crescimento da resistência*” desta dissertação.

Os estudos foram realizados com os cimentos disponíveis no Brasil na época, identificados por CP 25, CP 32, AF 35, AF 32, POZ 25 e POZ 32. Inicialmente analisados na tese de doutorado de Helene (1987), os estudos, assim como as conclusões, foram posteriormente publicados em literatura consagrada sobre o tema, em livro denominado “*Manual de Dosagem e Controle do Concreto*” (HELENE; TERZIAN, 1992).

Na mesma época, o Eng. Carlos Eduardo de Siqueira Tango, pesquisador do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, realizou estudos sobre a previsão da resistência à compressão de cimentos e concretos, dando sequência, às pesquisas e ensaios iniciados na década de 1930 pelo Eng. Ary Torres, também do IPT. No referido estudo, Tango (1983)³⁵ utilizou a Equação 2.16, deduzida a partir do modelo proposto por Duff Abrams (Equação 2.2), para estimar a resistência à compressão aos 28 dias de idade a partir de resistências obtidas aos 2, 3 e 7 dias, conforme apresentado a seguir:

$$f_{c(28)} = \frac{k_{13}}{k_{14}^{\frac{\log k_{15}}{\log k_{16}}}} * f_{c(t)}^{\frac{\log k_{15}}{\log k_{16}}} \quad (2.16)^{36}$$

Onde:

$f_{c(28)}$: resistência à compressão aos 28 dias, em MPa;

$f_{c(t)}$: resistência à compressão em uma idade t , em MPa;

k_{13} e k_{15} : coeficientes de Abrams aos 28 dias;

k_{14} e k_{16} : coeficientes de Abrams para baixas idades (para $t = 2, 3$ ou 7 dias).

Atualmente, dois modelos teóricos que relacionam a resistência à compressão do concreto em função do tempo e, portanto, representam o desenvolvimento das curvas de crescimento da resistência, se destacam e vêm sendo amplamente utilizados e reconhecidos, são eles:

³⁵ TANGO, Carlos Eduardo de Siqueira. **Contribuição ao estudo da previsão da resistência à compressão de cimentos e concretos**. 1983. 462 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

³⁶ A dedução da Equação 2.16 (que é um caso geral da Equação 2.13) está apresentada no subitem 4.2 “*Modelo de Abrams*” desta dissertação.

- a) Modelo utilizado pela norma americana *ACI - American Concrete Institute, Committee 209* (ACI, 2008)³⁷, dado por:

$$f_{c(t)} = \left(\frac{t}{a+bt} \right) * f_{c(28)} \quad (2.17)^{38}$$

Onde:

$f_{c(t)}$: resistência à compressão do concreto na idade t , em MPa;

t : idade, em dias;

$f_{c(28)}$: resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, em MPa;

a : constante que depende do tipo de cimento e cura do concreto, em dias;

b : constante que depende do tipo de cimento e cura do concreto, adimensional.

- b) Modelo utilizado pelo código de norma europeu *fib Model Code for Concrete Structures 2020* (FIB, 2023)³⁹, dado por:

$$f_{c(t)} = e^{\left\{ s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}} \right] * \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}} \right) \right\}} * f_{c(t_{ref})} \quad (2.18)^{40}$$

Onde:

$f_{c(t)}$: resistência à compressão do concreto na idade t , em MPa;

$f_{c(t_{ref})}$: resistência à compressão na idade t_{ref} , dada em MPa;

t : idade, em dias;

t_{ref} : idade de controle e referência, em dias;

s_c : coeficiente adimensional que depende do tipo de cimento e da classe de resistência do concreto. Pode variar de $0,1 \leq s_c \leq 0,6$.

³⁷ AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 209.2R-08**: Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete. Farmington Hills: Ací, 2008. 43 p.

³⁸ Esta Equação 2.17 é detalhadamente estudada no subitem 4.4 “*Modelo ACI Committee 209*” desta dissertação.

³⁹ FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **2020**: Fib Model Code for Concrete Structures (2020). Lausanne: FIB, 2023. 780 p.

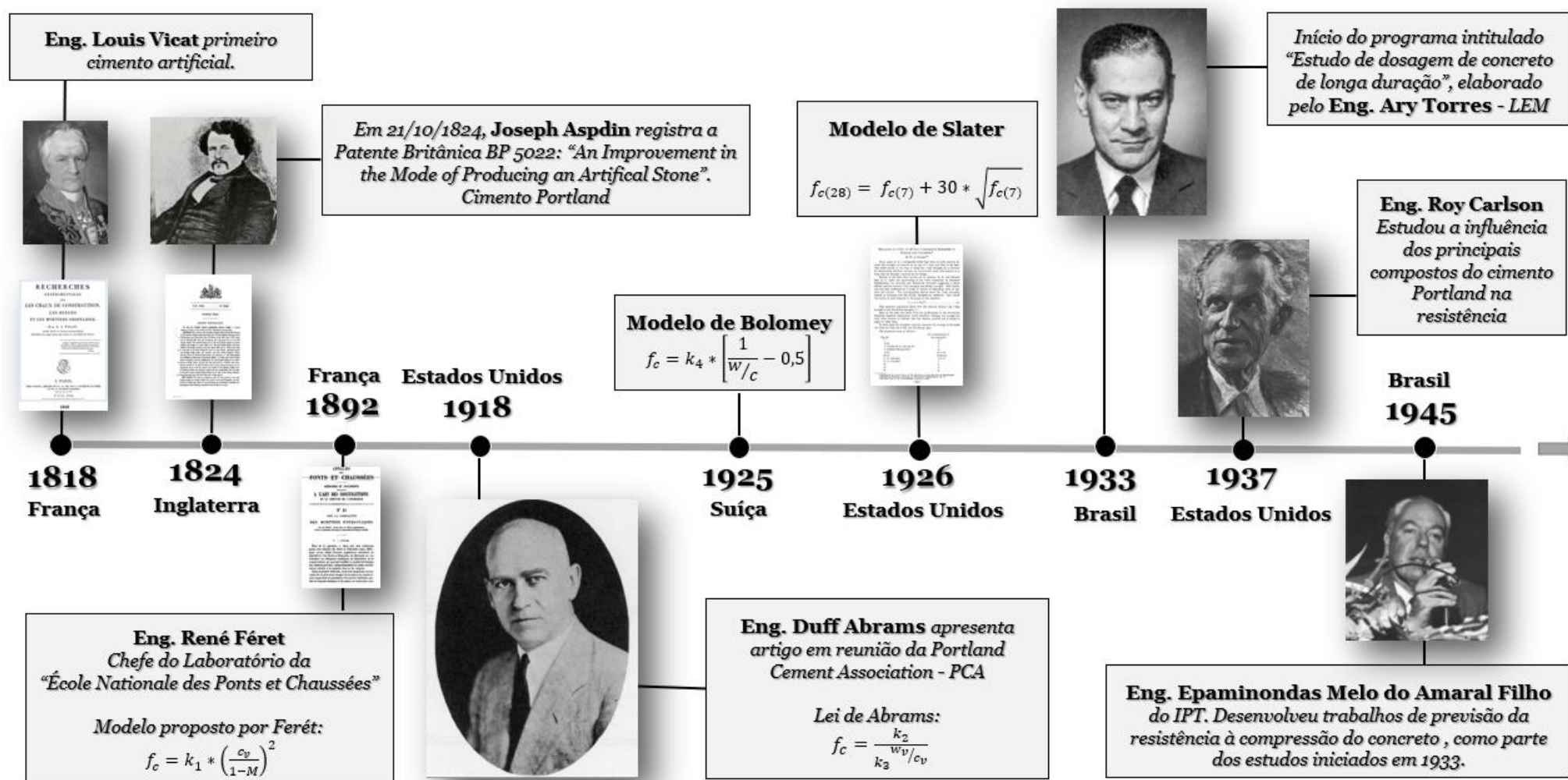
⁴⁰ Esta equação é detalhadamente estudada no subitem 4.6 “*Modelo fib Model Code 2020*” desta dissertação.

2.3 A evolução dos modelos teóricos representada na linha do tempo

De maneira a ilustrar a evolução dos modelos de comportamento da resistência, as Figuras 2.1 a 2.3 apresentam uma linha do tempo contendo os principais modelos teóricos desenvolvidos no mundo desde o advento do cimento Portland, assim como os pesquisadores e centros de pesquisa mencionados e analisados neste e nos subsequentes capítulos.

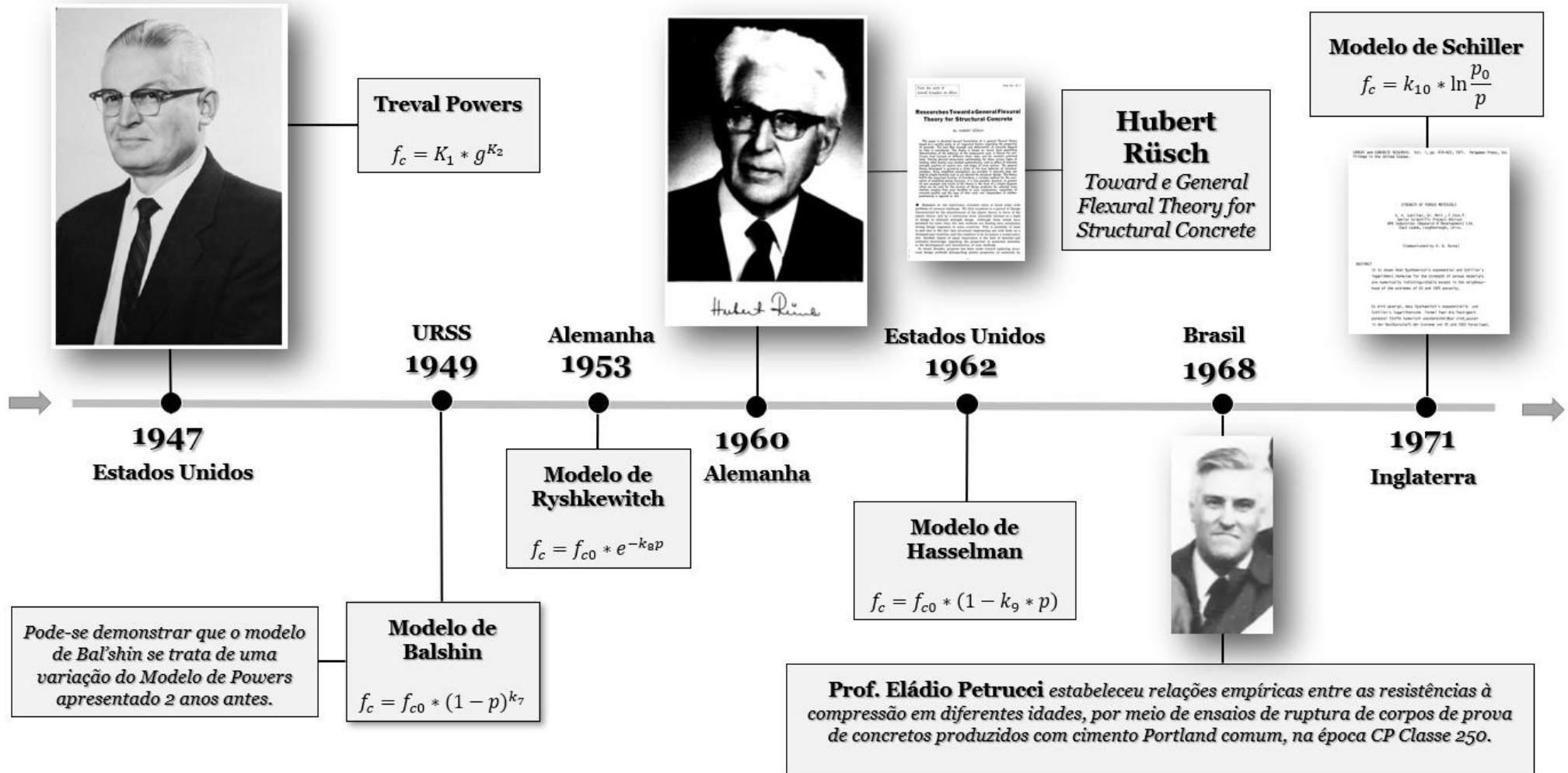
No Capítulo 4 deste trabalho denominado “*Modelos de Comportamento da Resistência*”, os modelos propostos por Féret, Abrams, Powers, ACI Committee 209, *fib* Model Code for Concrete Structures 2020 e outros serão detalhadamente analisados. No mesmo capítulo, no subitem 4.10, realiza-se uma análise comparativa entre os modelos ACI Committee 209 e *fib* Model Code 2020.

Figura 2.1 – Linha do tempo indicando pesquisadores e modelos teóricos, de 1818 até 1945.



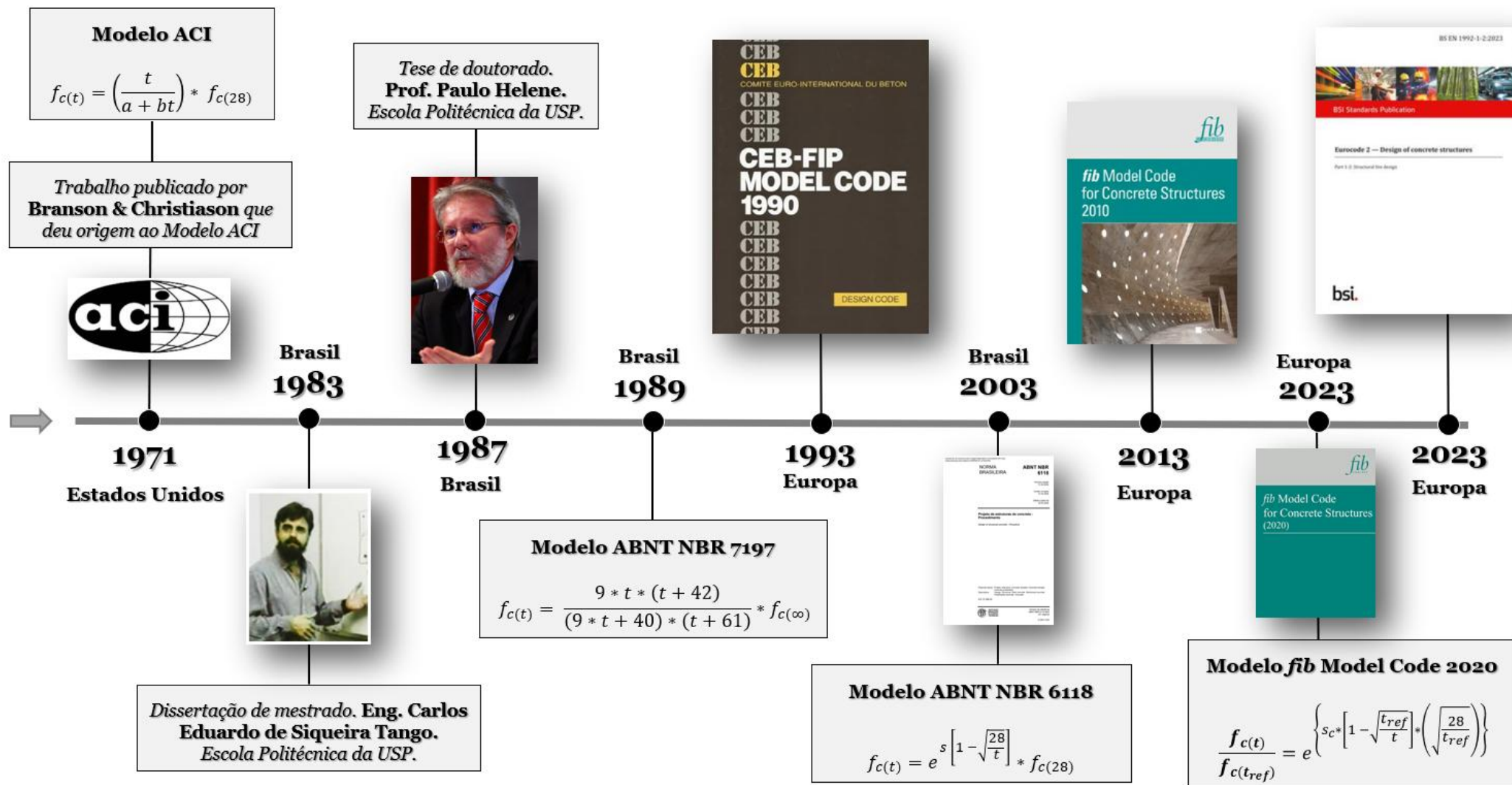
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 2.2 – Linha do tempo indicando pesquisadores e modelos teóricos, de 1945 até 1971.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 2.3 – Linha do tempo indicando pesquisadores e modelos teóricos, de 1971 até os dias atuais.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

A resistência à compressão do concreto se desenvolve a partir da hidratação do cimento Portland. Ou seja, imediatamente após o contato da água com o cimento anidro presente na mistura se iniciam as reações químicas de pega e endurecimento, resultando no aumento gradativo da resistência à compressão com o tempo.

A resistência à compressão do concreto é a principal propriedade mecânica do material sendo influenciada por fatores inerentes ao cimento, inerentes à mistura ou ainda, fatores externos relacionados ao ambiente e aos procedimentos de ensaio.

No primeiro caso, pode-se citar a composição química do cimento e sua superfície específica. No segundo caso, cita-se a relação água/cimento, grau de hidratação, a porosidade e adensamento, o teor de ar incorporado, as características dos agregados, zona de transição (região localizada na interface agregado/pasta) entre outros.

No que se refere aos fatores externos, pode-se mencionar principalmente o tempo, a temperatura e a ação da carga mantida que podem influenciar significativamente o desenvolvimento da resistência à compressão.

Portanto a resistência à compressão do concreto de cimento Portland não é uma propriedade única, fixa e estável pois é variável e dependente em cada momento da vida útil da estrutura, das condições de carga, das ações ambientais, das características geométricas e dos procedimentos de ensaio. Estes últimos envolvem as etapas de amostragem, moldagem, transporte, sazonalidade, cura, preparo dos topos, centralização do corpo de prova, velocidade de aplicação de carga na prensa etc. que, caso não sejam rigorosamente realizadas como estabelecido nas normas ABNT NBR 5738:2015 (ABNT, 2015a)⁴¹, ABNT NBR 5739:2015 (ABNT, 2018a)⁴² e

⁴¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: Abnt, 2015a. 9 p.

⁴² ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Abnt, 2018a. 9 p.

ABNT NBR 7680-1:2015 (ABNT, 2015b)⁴³ podem implicar em alteração significativa da variabilidade do processo e dos resultados de ensaio, conduzindo a avaliações, análises, verificações e interpretações incorretas, que não refletem a realidade.

Por fim, deve-se ainda considerar a influência das adições minerais, dos aditivos, as condições de carregamento na central de concreto, mistura (homogeneização), adensamento e cura do concreto.

Discute-se adiante os parâmetros intervenientes na resistência à compressão do concreto relacionados com os principais modelos teóricos de comportamento da resistência à compressão do concreto apresentados neste trabalho de dissertação.

3.1 Composição química do cimento Portland anidro e sua hidratação

Inicialmente é necessário registrar que, na química do cimento, para fins práticos e de maneira a facilitar a representação dos principais compostos do cimento Portland, incluindo as reações químicas decorrentes do processo de fabricação e hidratação, costuma-se adotar abreviações mundialmente consagradas, conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Abreviações dos principais compostos comumente adotadas na química do cimento Portland.

Etapas	Compostos Químicos	Abreviações	Nome do Composto
Matéria-prima	CaO	C	Óxido de Cálcio ou Cal Livre
	SiO₂	S	Dióxido de Silício ou Sílica
	Al₂O₃	A	Óxido de Alumínio ou Alumina
	Fe₂O₃	F	Óxido de Ferro
Fabricação	3CaO.SiO₂	C ₃ S	Alita ou Silicato Tricálcico
	2CaO.SiO₂	C ₂ S	Belita ou Silicato Dicálcico
	3CaO.Al₂O₃	C ₃ A	Aluminita ou Aluminato Tricálcico
	4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃	C ₄ AF	Ferrita ou Ferroaluminato Tetracálcico
	CaSO₄	C $\bar{S}$	Sulfato de Cálcio ou Gipsita
Hidratação	H₂O	H	Água
	3CaO.2SiO₂.3H₂O	C ₃ S $\cdot$ H ₃ ou C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
	Ca(OH)₂	CH	Hidróxido de Cálcio ou Portlandita
	3CaO.Al₂O₃.6H₂O	C ₃ AH ₆	Katoita
	Fe₂O₃.3H₂O	FH ₃	Trióxido de Ferro Hidratado
	CaSO₄.2H₂O	C $\bar{S}$ H ₂	Sulfato de Cálcio Hidratado
	6CaO.Al₂O₃.3SO₃.32H₂O	C-A- $\bar{S}$ -H	Trissulfoaluminato de Cálcio Hidratado ou Etringita Primária ou Fase AFt
	4CaO.Al₂O₃.SO₃.12H₂O	C ₄ A $\bar{S}$ H ₁₂	Monossulfoaluminato de Cálcio Hidratado ou Etringita Secundária ou Fase AFm

Fonte: Elaborada pelo autor.

⁴³ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-1**: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro: Abnt, 2015b. 27 p.

A fabricação do cimento Portland requer que a matéria-prima contenha em sua composição química: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Ocorre que estes óxidos não são encontrados em proporções adequadas em um único tipo de material. Daí a necessidade da utilização de uma mistura de calcário, argila, areia e minério de ferro, sendo estes dois últimos empregados em menores proporções para a correção dos teores requeridos de SiO_2 e Fe_2O_3 , respectivamente.

De acordo com Bogue (1929)⁴⁴, pode-se admitir para uma composição típica, as seguintes proporções de óxidos na matéria-prima do cimento Portland: $\%\text{CaO} = 62,5$; $\%\text{SiO}_2 = 22,3$; $\%\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,5$; $\%\text{Fe}_2\text{O}_3 = 3,4$ e $\%\text{SO}_3 = 2,0$ ⁴⁵.

Na realidade, admite-se uma certa variabilidade dos teores destes compostos, conforme limites apresentados por Coutinho (2006) e Lea (1970)⁴⁶ na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Teor limite dos principais compostos da matéria-prima utilizada na fabricação do cimento Portland.

Compostos	Teor limite (% em massa)	
	conforme Coutinho (2006)	conforme Lea (1970)
CaO	60 a 68	60 a 67
SiO₂	17 a 25	17 a 25
Al₂O₃	2 a 9	3 a 8
Fe₂O₃	0,5 a 6	0,5 a 6
SO₃	2 a 3,5	1 a 3

Fonte: Coutinho (2006) e Lea (1970).

A matéria-prima, também conhecida por farinha crua (mistura homogênea de calcário, argila, areia e minério de ferro), constituída pelos óxidos nas proporções mencionadas na Tabela 3.2 é então introduzida em um forno rotativo, aquecida até uma temperatura de aproximadamente 1450 °C e rapidamente resfriada dando origem ao clínquer de cimento Portland.

Para melhor entendimento, a Figura 3.1, obtida em Kosmatka e Wilson (2011)⁴⁷, apresenta uma ilustração das etapas do processo de produção do clínquer

⁴⁴ BOGUE, R. H.. Calculation of the Compounds in Portland Cement. **Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition**, [S.L.], v. 1, n. 4, p. 192-197, out. 1929. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ac50068a006>.

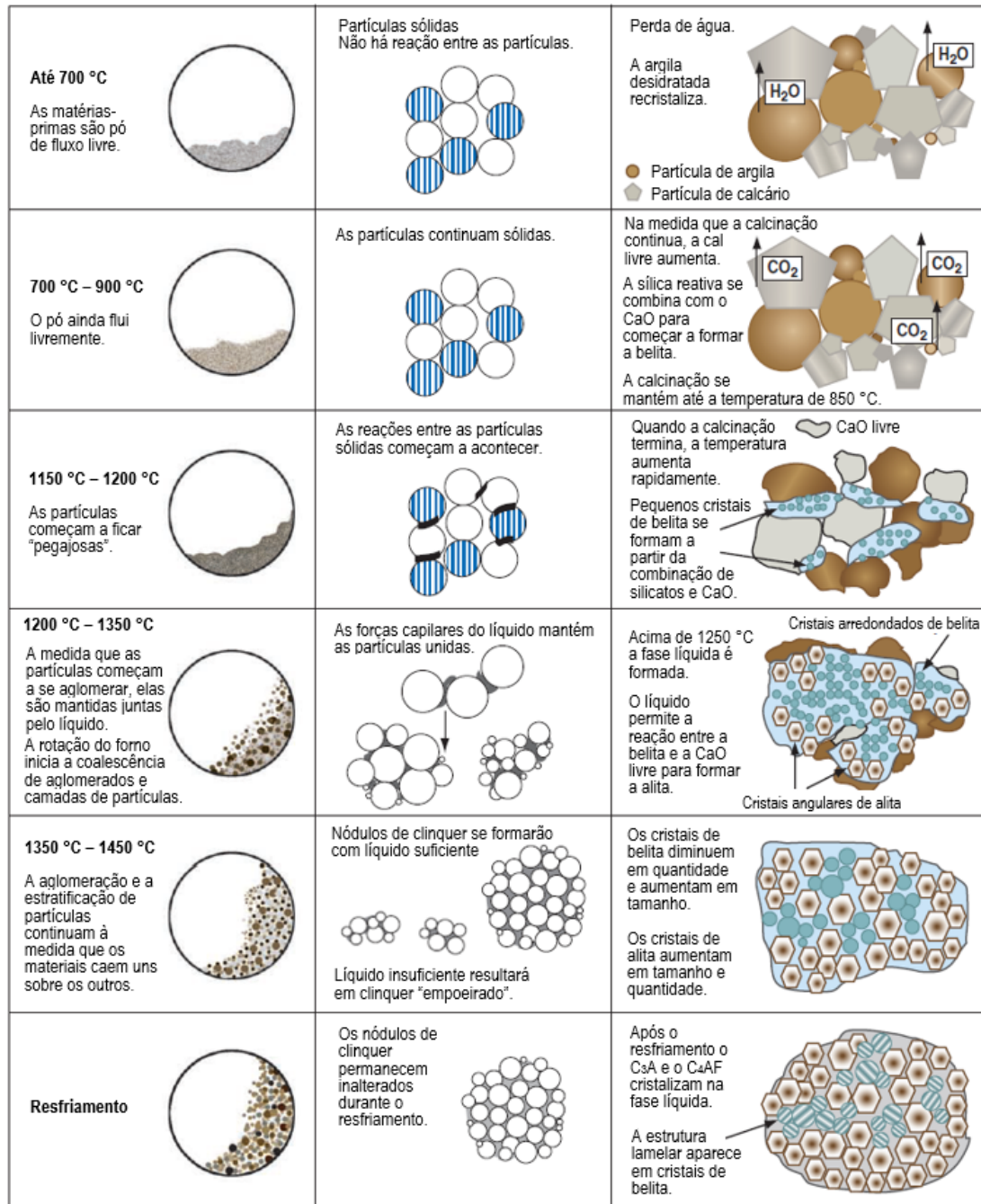
⁴⁵ A porcentagem de trióxido de enxofre (SO_3) pode ser obtida por meio da adição, após a clínquerização, de sulfato de cálcio, também conhecido por gipsita (CaSO_4).

⁴⁶ LEA, F. M.. **The Chemistry of Cement and Concrete**. 3. ed. Glasgow: Edward Arnold, 1970. 727 p.

⁴⁷ KOSMATKA, Steven H.; WILSON, Michelle L.. **Design and Control of Concrete Mixtures**: the guide to applications, methods, and materials. 15. ed. Washington DC: PCA - Portland Cement Association, 2011. 444 p.

de cimento Portland (clinkerização), com foco nas transformações mineralógicas no interior do forno rotativo.

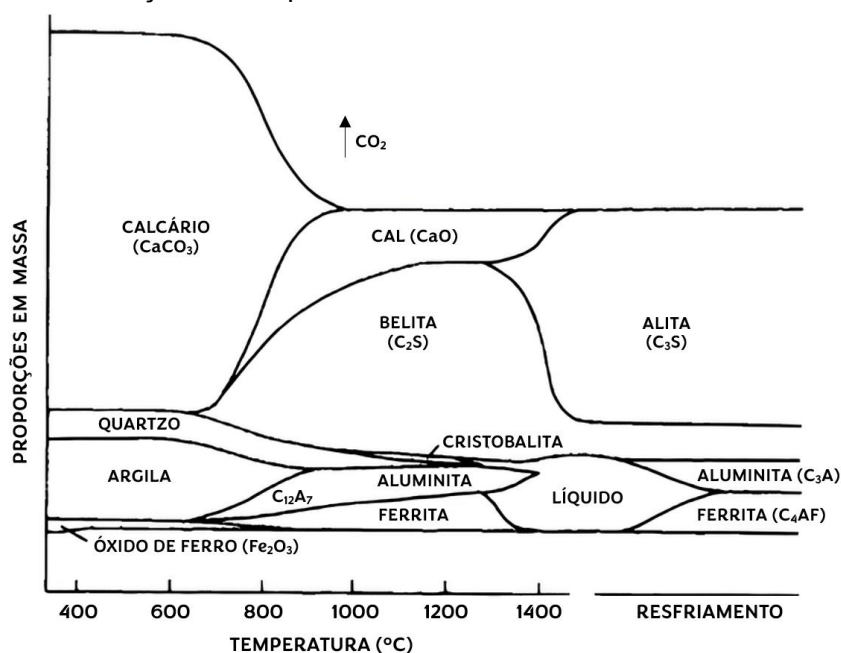
Figura 3.1 – Processo de produção do clínquer de cimento Portland no interior do forno rotativo.



Fonte: Kosmatka e Wilson (2011), p. 33.

O clínquer de cimento Portland resultante é composto principalmente por alita (C₃S), belita (C₂S), aluminita (C₃A) e ferrita (C₄AF), que se formam, à medida que a temperatura se eleva, de acordo com as transformações mineralógicas simplificadas apresentadas no diagrama de fases da Figura 3.2.

Figura 3.2 – Transformações mineralógicas no interior do forno de clínquer, em função da temperatura.



Fonte: Taylor (1997), p. 56.

Com base nas proporções dos compostos da matéria-prima (BOGUE, 1929) e nas expressões mencionadas na norma ASTM C150/C150M-19a:2019 “*Standard specification for Portland cement*” (ASTM, 2019)⁴⁸, torna-se possível determinar o teor dos principais compostos do cimento Portland, conforme apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Teor dos compostos do cimento Portland anidro.

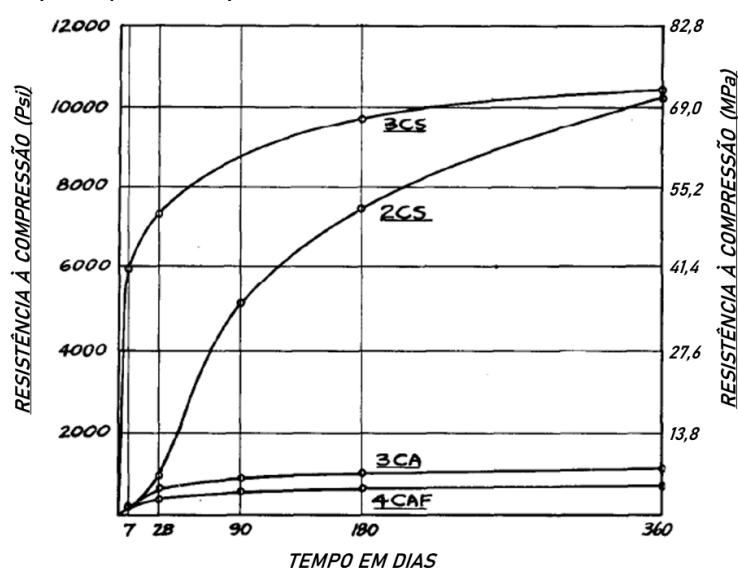
Nome do composto		Composição	Abreviatura	Teor dos compostos (% em massa)*
Silicato tricálcico	Alita	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	44,4
Silicato dicálcico	Belita	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	30,6
Aluminato tricálcico	Aluminita	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	6,1
Ferroaluminato tetracálcico	Ferrita	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	10,4
Compostos secundários		CaSO ₄ , CaO, MgO, K ₂ O, Na ₂ O etc.		8,5
* Determinação do teor dos compostos, ASTM C150/C150M-19a:2019				
$\%C_3S = 4,071 \times \%CaO - 7,600 \times \%SiO_2 - 6,718 \times \%Al_2O_3 - 1,430 \times \%Fe_2O_3 - 2,852 \times \%SO_3$				
$\%C_3S = 4,071 \times 62,5 - 7,600 \times 22,3 - 6,718 \times 4,5 - 1,430 \times 3,4 - 2,852 \times 2,0 = 44,4\%$				
$\%C_2S = 2,867 \times \%SiO_2 - 0,754 \times C_3S = 2,867 \times 22,3 - 0,754 \times 44,4 = 30,6\%$				
$\%C_3A = 2,650 \times \%Al_2O_3 - 1,692 \times \%Fe_2O_3 = 2,650 \times 4,5 - 1,692 \times 3,4 = 6,1\%$				
$\%C_4AF = 3,043 \times \%Fe_2O_3 = 3,043 \times 3,4 = 10,4\%$				
Compostos secundários = 100 - %C ₃ S - %C ₂ S - %C ₃ A - %C ₄ AF = 100 - 44,4 - 30,6 - 6,1 - 10,4 = 8,5%				

Fonte: Elaborada pelo autor com base nas expressões apresentadas na norma ASTM (2019) e nos teores de compostos admitidos por Bogue (1929).

⁴⁸ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C150/C150M-19a**: Standard Specification for Portland Cement. West Conshohocken: Astm International, 2019. 10 p.

Nota-se portanto que cerca de 3/4 da massa de cimento Portland anidro é constituída por silicatos de cálcio (C_3S e C_2S). Roy Carlson, da Universidade da Califórnia em Berkeley, em artigo denominado “*Results of recent cement research and their partial application*” (CARLSON, 1937)⁴⁹ ao analisar os compostos do cimento Portland notou que a hidratação destes silicatos de cálcio desempenha papel fundamental no desenvolvimento da resistência à compressão do concreto, conforme apresentado graficamente na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Desenvolvimento da resistência à compressão ao longo do tempo dos principais compostos do cimento Portland.



Fonte: Carlson (1937), p. 4.

Observa-se que até os 28 dias de idade a hidratação do silicato tricálcico (C_3S) é a principal responsável pelo aumento da resistência à compressão do concreto. A partir daí, o silicato dicálcico (C_2S) também começa a desempenhar importante influência. Já os componentes aluminato tricálcico (C_3A) e o ferro aluminato tetracálcico (C_4AF) pouco contribuem com a resistência final à compressão do concreto.

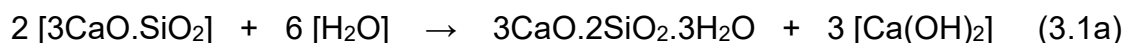
De acordo com Cincotto (2022)⁵⁰ a hidratação do cimento Portland é um sistema complexo e dinâmico, uma vez que inúmeras variáveis estão envolvidas.

⁴⁹ CARLSON, Roy W.. Results of Recent Cement Research and Their Partial Application. **Journal Of The Franklin Institute**: Devoted to Science and the Mechanic Arts, Cambridge, v. 224, n. 1, p. 1-18, jul. 1937.

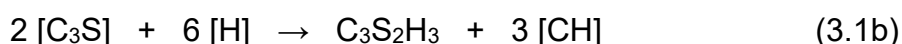
⁵⁰ CINCOTTO, Maria A. Reações de Hidratação e Pozolânicas. In: TUTIKIAN, Bernardo; PACHECO, Fernanda; ISAÍIA, Geraldo; BATTAGIN, Inês (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2022. Cap. 11. p. 451-484.

Devido a esta complexidade, costuma-se discutir as reações de hidratação dos principais compostos do cimento Portland separadamente, como detalhado a seguir.

A reação de hidratação da alita dá origem ao silicato de cálcio hidratado e ao hidróxido de cálcio:



A mesma equação química pode ser representada de maneira simplificada, considerando as abreviações indicadas na Tabela 3.1, comumente utilizadas na química do cimento:

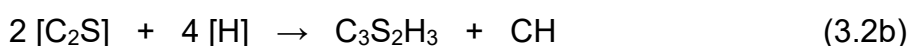


O primeiro composto resultante da hidratação do C_3S é o silicato de cálcio hidratado ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$, ou simplesmente C-S-H), responsável pela resistência mecânica do concreto. Já o segundo composto, o hidróxido de cálcio, também chamado de portlandita (CH), mantém a alcalinidade do concreto elevada, da ordem de $\text{pH} = 12,5$.

A reação de hidratação da belita resulta nos mesmos compostos mencionados no parágrafo anterior:



Ou abreviadamente:

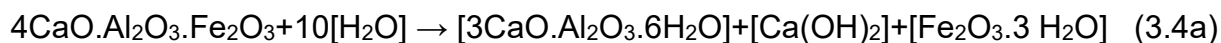
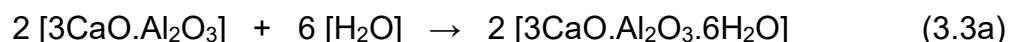


Paulon, Andrade Neto, Longhi e Kirchheim (2022)⁵¹ consideram que o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) corresponde entre 50% e 65% do volume de sólidos de uma pasta de cimento completamente hidratada.

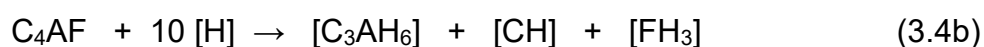
A hidratação do aluminato tricálcico (C_3A) e do ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) ocorrem rapidamente, dando origem a katoita (C_3AH_6) que leva ao

⁵¹ PAULON, Vladimir; ANDRADE NETO, José da Silva; LONGHI, Márion; KIRCHHEIM, Ana Paula. Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido. In: TUTIKIAN, Bernardo; PACHECO, Fernanda; ISAÍIA, Geraldo; BATTAGIN, Inês (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2022. Cap. 16. p. 661-698.

enrijecimento e a perda de trabalhabilidade em poucos minutos, conforme apresentado nas reações químicas de hidratação:



Ou ainda, representadas de maneira abreviada, respectivamente:

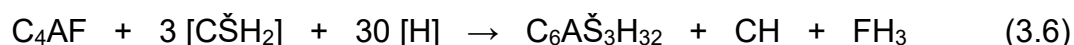
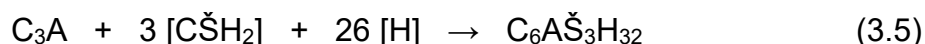


Visando controlar o ímpeto por água dos aluminatos e, dessa maneira, atrasar a pega e viabilizar a utilização dos produtos de cimento Portland, adiciona-se aos compostos do cimento Portland anidro, durante a moagem do clínquer, o sulfato de cálcio (CaSO_4 , também chamado de gipsita).

As reações entre o aluminato tricálcico (C_3A) e do ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) com o sulfato de cálcio dissolvido durante a hidratação ($\text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O}$, na química do cimento representado por $\text{C}\check{\text{S}}\text{H}_2$) leva à formação do trissulfoaluminato de cálcio hidratado, também chamado de fase AFt e mais conhecido como etringita primária ($6\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{SO}_3.32\text{H}_2\text{O}$, na química do cimento também representada por $\text{C}_6\text{A}\check{\text{S}}_3\text{H}_{32}$ ou C-A- $\check{\text{S}}$ -H).

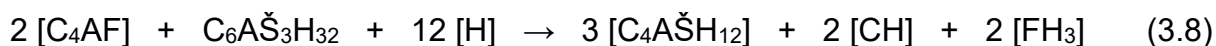
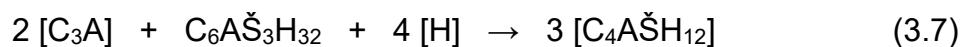
A etringita primária, constituída por cristais longos e finos (formato acicular), exerce um importante papel no endurecimento da pasta e pega do cimento, mas não é suficientemente resistente para contribuir com a resistência mecânica da pasta de cimento Portland hidratado a longo prazo.

As Equações 3.5 e 3.6 apresentam a reação química de hidratação do C_3A e do C_4AF na presença de sulfato de cálcio:



Após o consumo do sulfato de cálcio (gipsita), a etringita se torna instável e se decompõe gradualmente, convertendo-se em monossulfoaluminato de cálcio

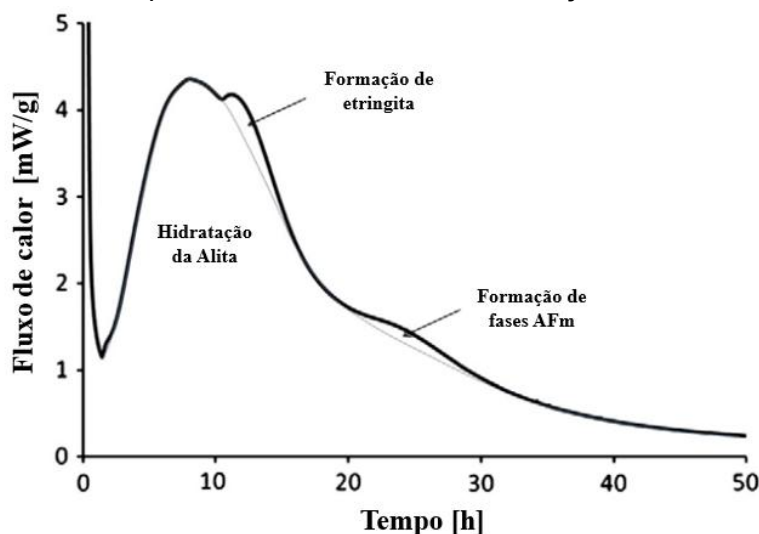
hidratado ($C_4A\check{S}H_{12}$), também conhecido por fase AFm. As Equações 3.7 e 3.8 apresentam a reação descrita:



Nota-se portanto que, tanto as reações de hidratação da aluminita (C_3A), como da ferrita (C_4AF), quando da presença do sulfato de cálcio hidratado ($C\check{S}H_2$), ocorrem em duas etapas, por assim dizer. A primeira dando origem a etringita primária (fase AFt), que por sua vez reage com os próprios compostos dando origem ao monossulfoaluminato de cálcio hidratado (fase AFm).

As reações de hidratação do cimento Portland são exotérmicas, liberam calor e podem ser observadas em um gráfico da curva típica do fluxo do calor de hidratação em função do tempo, conforme apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Curva típica do fluxo do calor de hidratação do cimento Portland.



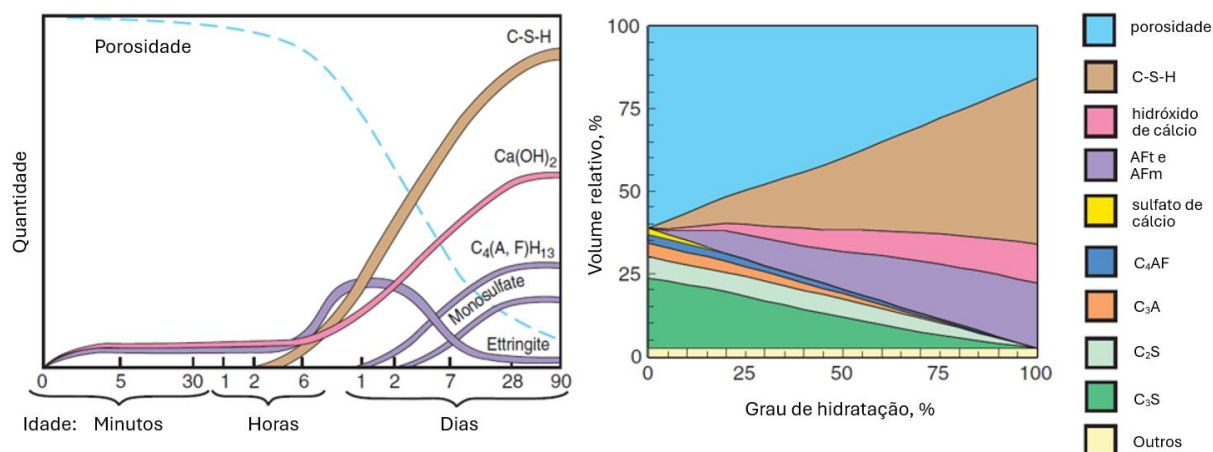
Fonte: Bullard, Jennings, Livingston, Nonat, Scherer, Schweitzer, Scrivener e Thomas (2011)⁵², p. 1219.

A Figura 3.5, obtida em Kosmatka e Wilson (2011) apresenta o desenvolvimento dos compostos hidratados, para uma pasta produzida com cimento

⁵² BULLARD, Jeffrey W.; JENNINGS, Hamlin M.; LIVINGSTON, Richard A.; NONAT, Andre; SCHERER, George W.; SCHWEITZER, Jeffrey S.; SCRIVENER, Karen L.; THOMAS, Jeffrey J.. Mechanisms of cement hydration. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 41, n. 12, p. 1208-1223, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>.

Portland tipo I (ASTM, 2019), com relação em volume dos compostos anidros de $C_3S = 55\%$, $C_2S = 18\%$, $C_3A = 10\%$, $C_4AF = 8\%$ e relação $w/c = 0,50$.

Figura 3.5 – Desenvolvimento dos compostos hidratados do cimento Portland em função do tempo (à esquerda) e em função do grau de hidratação (à direita).



Fonte: Kosmatka e Wilson (2011), p. 50.

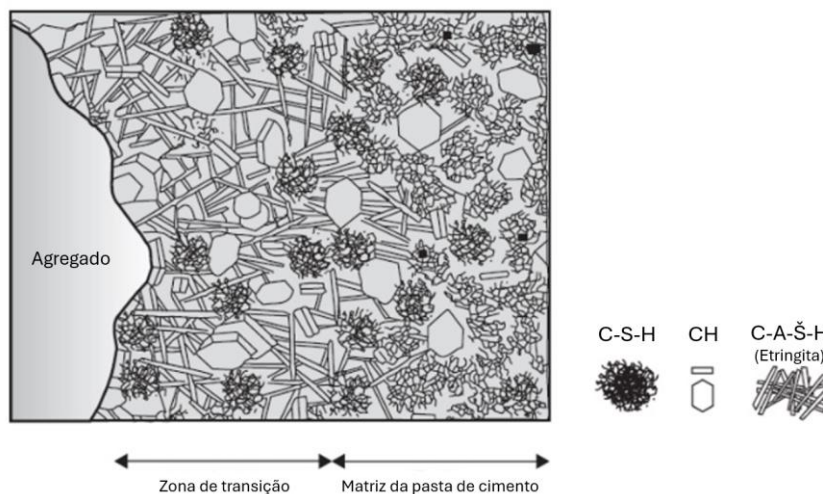
Resumindo, conclui-se que os dois maiores e mais importantes compostos constituintes do cimento Portland são o C_3S e o C_2S , enquanto os produtos primários de hidratação dessas fases são: a portlandita (CH) e os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), sendo este último responsável pela resistência mecânica das pastas, argamassas e concretos.

A matriz cimentícia é composta ainda por outros produtos de hidratação como a etringita primária (Aft), o monossulfoaluminato de cálcio (AFm) entre outros, além da água retida nos poros de vários tamanhos e em diferentes formas: água livre, água capilar e quimicamente combinada (NOBRE; PÉREZ; BLOISE JUNIOR; ANGULO; OTA; QUARCIONI, 2022)⁵³.

Na Figura 3.6 é possível observar uma representação esquemática da matriz da pasta de cimento e alguns de seus compostos hidratados.

⁵³ NOBRE, Thiago Ricardo Santos; PÉREZ, Martha González; BLOISE JUNIOR, Antônio Carlos; ANGULO, Sérgio Cirelli; OTA, Shoko; QUARCIONI, Valdecir Angelo. Caracterização de fases de cimento Portland por meio das técnicas de difratometria de raios X e espectroscopia de ressonância magnética nuclear de ^{29}Si no estado sólido. **Revista Ipt: Tecnologia e Inovação**, São Paulo, v. 6, n. 19, p. 67-88, maio 2022.

Figura 3.6 – Representação esquemática dos compostos da pasta de cimento hidratada C-S-H, CH (portlandita) e C-A-Š-H (etringita).



Fonte: Mehta e Monteiro (2006)⁵⁴, p. 43.

Nota-se na Figura 3.6 uma relativa diferença na concentração dos compostos hidratados de cimento Portland na região de interface com o agregado. Trata-se da chamada zona de transição, que devido as particularidades de sua microestrutura, também influencia a resistência à compressão do concreto.

Paulon e Monteiro (1991)⁵⁵ associam a zona de transição a uma auréola em torno do agregado com uma espessura de aproximadamente 50 µm, na qual a cristalização dos hidratos ocorre de maneira distinta da observada em outras regiões da matriz da pasta, resultando em um local com características mais fracas e de menor resistência.

Para melhor entendimento da microestrutura da zona de transição, cita-se um interessante trabalho publicado por Scrivener e Pratt (1996)⁵⁶ que descreve a formação dos compostos hidratados nessa região.

O trabalho supracitado menciona que logo após a mistura do concreto, filmes de água se formam na superfície do agregado, aumentando a relação água/cimento

⁵⁴ MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concrete**: microstruture, properties, and materials. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006. 660 p.

⁵⁵ PAULON, Vladimir A.; MONTEIRO, Paulo José M.. **Estudos da Microestrutura da Zona de Transição entre a Pasta de Cimento e o Agregado**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, 1991. 32 p. BT/PCC/43.

⁵⁶ SCRIVENER, Karen L.; PRATT, Peter L.. Characterisation of interfacial microstructure. In: MASO, J. C. (ed.). **Interfacial Transition Zone in Concrete**. Toulouse: E & Fn Spon, 1996. p. 2-20.

(w/c) na interface. Em seguida, os produtos de hidratação precipitam nesta região, com predominância da etringita primária (C-A-Š-H) e do hidróxido de cálcio (CH). Como a relação água/cimento é mais elevada, os produtos apresentam cristais relativamente maiores, dando origem a uma microestrutura mais porosa nas proximidades do agregado.

O empacotamento dos grãos de cimento, definido pela distribuição e tamanho das partículas, também desempenha papel fundamental neste cenário, resultando em gradientes microestruturais que se estendem por cerca de 50 µm (a partir da superfície do agregado), na qual, à medida que se aproxima da interface:

- ✓ a quantidade de cimento anidro diminui;
- ✓ a porosidade capilar aumenta;
- ✓ a quantidade de hidróxido de cálcio (CH) aumenta e apresenta orientação preferencial, normal à superfície do agregado;
- ✓ a quantidade de etringita (C-A-Š-H) aumenta.

Desta maneira, a zona de transição, embora composta pelos mesmos produtos de hidratação da pasta de cimento, possui microestrutura e propriedades bem distintas e menores resistências. De acordo com Mehta e Monteiro (2014) pode ser tratada como uma fase distinta e, sob certas circunstâncias, limitante da resistência do concreto.

Por outro lado, Lima (2000)⁵⁷ ao estudar, experimentalmente, a influência da zona de transição na resistência à compressão do concreto registra que os efeitos na interface não devem ser superestimados, uma vez que com o aumento da idade, a resistência da zona de transição pode se tornar igual ou superior à resistência da matriz. Isto poderia acontecer como resultado da cristalização de novos produtos nos vazios da zona de transição através de reações químicas lentas entre constituintes da pasta de cimento e o agregado. Estas interações contribuem para a resistência porque tendem também a reduzir a concentração de hidróxido de cálcio (CH) na zona de transição.

⁵⁷ LIMA, Eliane Pereira de. **Influência do volume da pasta na zona de transição pasta/agregado com relação às propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto**. 2000. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil Pcc/Usp, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

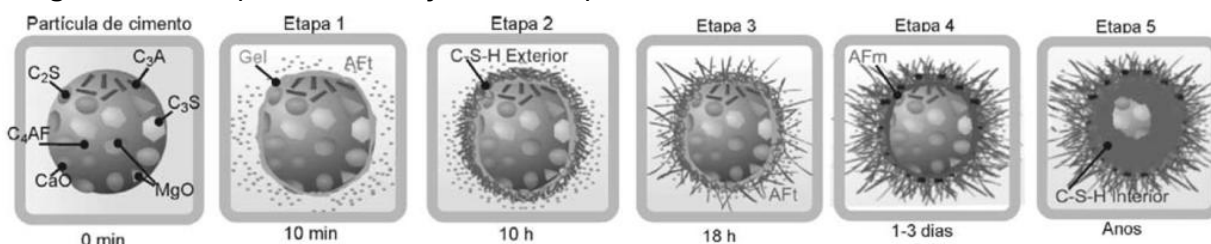
Por fim, salienta-se que, as reações de hidratação do cimento são muito mais complexas que as apresentadas neste subitem, pois o cimento Portland, além da gipsita, também é constituído por impurezas e outros compostos secundários tais como aditivos e adições. As adições de materiais cimentícios suplementares (MCS) reagem com produtos da hidratação inicial formando novos compostos e aumentando ainda mais a complexidade das reações resultantes. Entretanto, convém registrar que, no contexto deste trabalho as reações químicas simplificadas apresentadas são suficientes para o entendimento dos modelos teóricos aqui estudados.

3.2 Finura do cimento

A hidratação do cimento Portland se inicia na superfície das partículas anidras. Sendo assim, é intuitivo asseverar que a área superficial do cimento em contato com a água representa, por assim dizer, o material disponível para hidratação (NEVILLE; BROOKS, 2013)⁵⁸.

Para melhor entendimento, a Figura 3.7, obtida em Costa, Carvalho, Bordado e Nunes (2009)⁵⁹, ilustra as etapas de hidratação de uma partícula de cimento, onde se observa a formação dos compostos hidratados a partir da superfície de uma partícula de cimento em direção a seu núcleo.

Figura 3.7 – Etapas de hidratação de uma partícula de cimento Portland.



Fonte: Costa, Carvalho, Bordado e Nunes (2009), p. 32.

Em 1922, Duff Abrams estudou a resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos de variadas finuras e sua influência, por meio da análise de ensaios de ruptura de mais de 6.000 corpos de prova em idades variando de 7 dias a

⁵⁸ NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p. Tradução de: Ruy Alberto Cremonini.

⁵⁹ COSTA, C.; CARVALHO, P. Almeida de; BORDADO, J. C.; NUNES, A.. Estudo de Argamassas de base cimentícia por microscopia eletrônica de varrimento. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, v. 21, n. 3/4, p. 31-35, jul. 2009.

1 ano (THOMAZ, 2024a)⁶⁰. Os resultados do referido estudo, denominado “*Effect of Fineness of Cement*”, indicaram que:

- ✓ o tempo de pega do cimento é reduzido pela maior finura, em algumas situações o tempo inicial de pega, medido com a agulha de Vicat foi reduzido em até 10 minutos;
- ✓ a influência da moagem fina do cimento na resistência à compressão com a idade do concreto não significa que as partículas mais grossas do cimento não se hidratam, mas indica que o principal resultado das moagens mais finas é o de acelerar o endurecimento inicial do concreto.

Este assunto também foi estudado por Swenson, Wagner e Pigman (1935)⁶¹ em trabalho denominado “*Effect of granulometric composition of cement on the properties of pastes, mortars and concretes*”. Assumindo que a partícula de cimento anidro possui um formato esférico de raio r e que esta é hidratada a partir da sua região superficial, até uma profundidade x , de tal maneira que o raio do material anidro tenha sido reduzido a um valor igual a $(r - x)$.

Os pesquisadores concluíram que o grau de hidratação da partícula de cimento pode ser determinado em função do tempo e do raio da partícula de cimento, de acordo com a seguinte modelo teórico:

$$\alpha_p = \frac{r^3 - (r-x)^3}{r^3} = \frac{r^3 - (r - 3 \cdot \log_{10} t)^3}{r^3}, \quad \text{com } 0 \leq (x = 3 \cdot \log_{10} t) \leq r. \quad (3.9)$$

Onde:

α_p : grau de hidratação da partícula de cimento, $0 \leq \alpha_p \leq 1$;

r : raio da partícula de cimento anidro, admitida como esférica, em μm ;

x : profundidade de hidratação, $0 \leq x \leq r$, em μm ;

t : tempo de hidratação, em dias. Com $1 \leq t \leq 10^{r/3}$, r em μm .

⁶⁰ THOMAZ, Eduardo C. S.. **Notas de Aula IME - Instituto Militar de Engenharia**: efeito da finura do cimento. Efeito da Finura do Cimento. Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/>. Acesso em: 10 nov. 2024a.

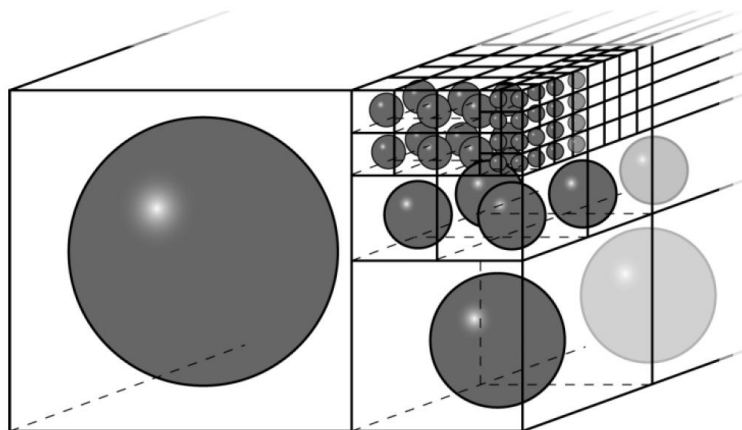
⁶¹ SWENSON, J. Arthur; WAGNER, Lacey A.; PIGMAN, George L.. Effect of granulometric composition of cement on the properties of pastes, mortars and concretes. **Journal Of Research Of The National Bureau Of Standards**, Washington, v. 14, p. 419-448, abr. 1935. Mensal. Research Paper RP777.

Sendo assim, por meio da emprego da Equação 3.9, observa-se que para um mesmo tempo de hidratação (t), quanto menor o raio da partícula de cimento (r), maior é o grau de hidratação da partícula (α_p). Por exemplo, considerando uma idade $t = 28$ dias, para partículas de cimento com raios de $r = 10 \mu\text{m}$ e $r = 15 \mu\text{m}$, obtém-se os seguintes valores de grau de hidratação: $\alpha_p = 0,82$ e $\alpha_p = 0,64$, respectivamente.

Maruyama, Noguchi e Matsushita (2005)⁶², pesquisadores das Universidades de Nagoya e de Tóquio, alertam para o fato de que as partículas de cimento Portland apresentam regiões de contato entre si, que aumentam com o tempo, na medida que as reações se desenvolvem, diminuindo a área de contato com a água e influenciando a dinâmica de hidratação.

Entretanto, no modelo apresentado na Equação 3.9, assume-se que cada partícula de cimento tem a mesma razão de volume de água disponível para seu volume de cimento, ou seja, considera-se que a partícula de cimento é esférica, centrada e cercada por água em um cubo, como evidenciado na Figura 3.8, que ilustra o esquema de esfera em cubo centrada.

Figura 3.8 – Representação esquemática da distribuição de partículas de cimento Portland.



Fonte: Maruyama, Noguchi e Matsushita (2005), p. 2.

Ainda, é importante registrar que, mesmo considerando um tipo de cimento específico, existe uma variabilidade das dimensões de suas partículas, por mais rigoroso que seja o controle de produção, moagem e classificação.

⁶² MARUYAMA, Ippei; NOGUCHI, Takafumi; MATSUSHITA, Tetsuro. HYDRATION MODEL OF PORTLAND CEMENT. **Journal Of Structural And Construction Engineering (Transactions Of Aij)**, [S.L.], v. 70, n. 593, p. 1-8, 2005. Architectural Institute of Japan. http://dx.doi.org/10.3130/aijs.70.1_7.

Sobre este assunto, de acordo com Vesilind (1980)⁶³, pesquisador da *Duke University* nos Estados Unidos, a distribuição dos tamanhos das partículas de cimento obedece a uma curva de distribuição de probabilidade contínua Rosin-Rammler. Trata-se da função de densidade de Weibull dada por:

$$f(r) = \frac{\beta}{r_d} * \left(\frac{r}{r_d}\right)^{\beta-1} * e^{-\left(\frac{r}{r_d}\right)^{\beta}}, \text{ com } r > 0 \quad (3.10)$$

Onde:

$f(r)$: função densidade de probabilidade;

r : raio da partícula, variável contínua, em μm ;

β : parâmetro de forma;

r_d : parâmetro de escala.

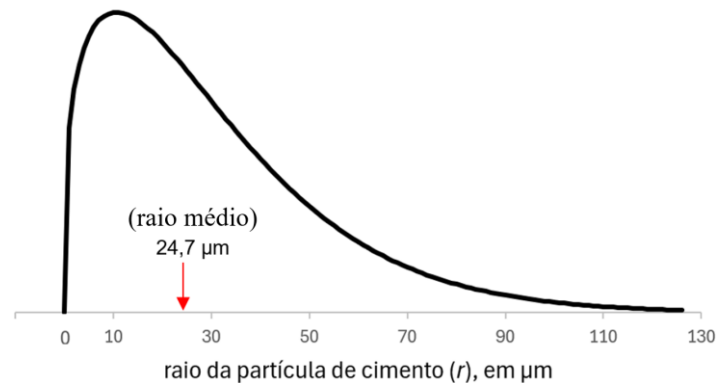
Subhani, Hussain e Reddy (2021)⁶⁴, após estudarem a distribuição do tamanho das partículas de cimento com ênfase na função Rosin-Rammler, utilizaram como referência os parâmetros de forma e de escala iguais a: $\beta = 1,3$ e $r_d = 32,73$. Isto corresponde a um cimento anidro com raio médio de partícula igual a $24,7 \mu\text{m}$.

Para melhor entendimento dos conceitos de variabilidade aqui apresentados e com base nos parâmetros de forma e de escala supracitados, torna-se possível construir um gráfico da função de densidade de probabilidade (distribuição de Weibull ou de Rosin-Rammler), como evidenciado na Figura 3.9.

⁶³ VESILIND, P. Aarne. The Rosin-Rammler particle size distribution. **Resource Recovery And Conservation**, [S.L.], v. 5, n. 3, p. 275-277, set. 1980. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3967\(80\)90007-4](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3967(80)90007-4).

⁶⁴ SUBHANI, S. Mahaboob; HUSSAIN, S. Altaf; REDDY, P. Dinesh Sankar. Comparison of particle size distribution estimated by Rosin-Rammler equation vs Malvern particle size analyzer for different brands of PPC cement. **Bulgarian Chemical Communications**, Sofia, v. 53, n. 1, p. 40-43, fev. 2021. Trimestral. Revisada em 05/02/2022.

Figura 3.9 – Curva de distribuição de Weibull (ou de Rosin-Rammler) aplicada ao tamanho das partículas de cimento Portland.

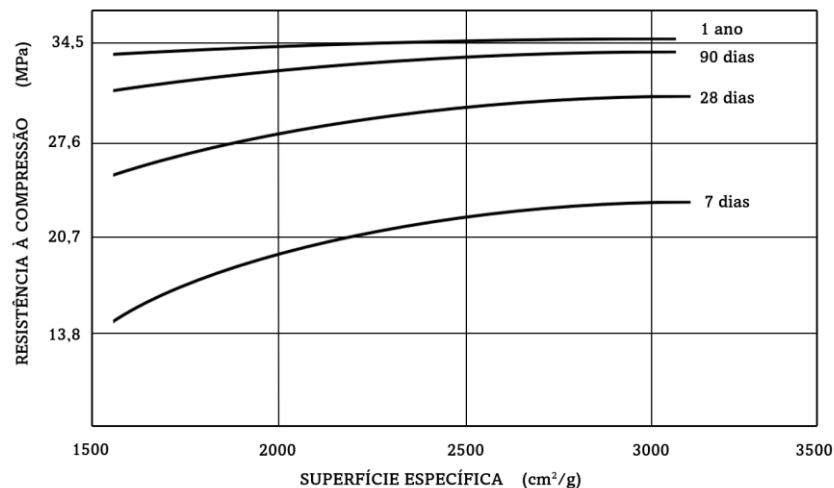


Fonte: Elaborada pelo autor com base em Subhani, Hussain e Reddy (2021).

Visando contornar esta variabilidade das dimensões das partículas em um determinado tipo de cimento, é possível utilizar o conceito de superfície específica que corresponde a área superficial por massa de cimento (m^2/kg ou cm^2/g).

Desta maneira, Price (1951)⁶⁵ apresentou graficamente a influência da finura do cimento, através de sua superfície específica, na resistência à compressão do concreto em diferentes idades, como evidenciado na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Relação entre a finura do cimento Portland e a resistência à compressão do concreto em diferentes idades.



Fonte: Price (1951), p. 419.

Nota-se, ao analisar o gráfico da Figura 3.10, a maior influência da moagem fina do cimento na idade de 7 dias, corroborando com as conclusões apontadas por Abrams em 1922 e registradas em Thomaz (2024a), vide início deste subitem.

⁶⁵ PRICE, Walter H.. Factors Influencing Concrete Strength. **Journal Of The American Concrete Institute**, Detroit, v. 22, n. 6, p. 417-432, fev. 1951.

Portanto, a taxa de hidratação do cimento Portland e, conseqüentemente o desenvolvimento da resistência à compressão de pastas, argamassas e concretos ao longo do tempo é dependente da finura do cimento ou da sua superfície específica.

3.3 Relação água/cimento e porosidade

Sabe-se que quanto menor a relação água/cimento (w/c) maior será a resistência à compressão do concreto (f_c), uma vez que o volume de poros na pasta de cimento hidratada cresce com o aumento da quantidade de água. Ou seja, na química do cimento, essas duas variáveis estão intimamente relacionadas.

Os poros são formados pela saída de parte da água que não participou das reações de hidratação do cimento. Ainda, esta água em excesso, antes da hidratação, provoca afastamento dos grãos de cimento numa magnitude tal, que os cristais em crescimento (produtos de hidratação) podem ou não colmatar esses espaços disponíveis (CAMPITELI, 1987)⁶⁶.

Uma explicação físico-química para a asserção descrita no parágrafo anterior foi apresentada por Aïtcin (2000)⁶⁷, com base na observação da microestrutura de pastas de cimento Portland através de microscópio eletrônico de varredura.

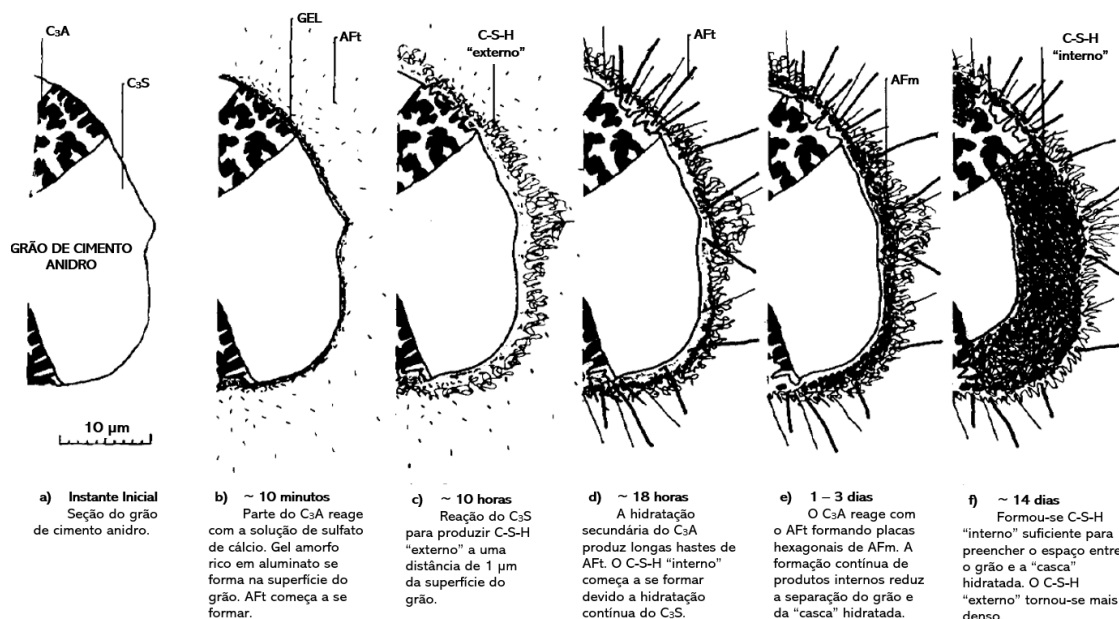
O pesquisador constatou que os produtos iniciais de hidratação, formados quando existe água em excesso na mistura fresca, consistem em grandes cristais que geram um considerável volume de vazios, são os chamados “*produtos externos*”, uma vez que se cristalizam fora dos limites originais da partícula de cimento em hidratação. Por outro lado, os produtos da hidratação formados dentro dos limites originais das partículas de cimento em hidratação, ou seja, quando há pouco espaço disponível no sistema, são chamados de “*produtos internos*” e são mais compactos.

A Figura 3.11 elaborada por Scrivener (1984, *apud* TAYLOR, 1997, p. 194) ilustra a formação do silicato de cálcio hidratado externo (“*C-S-H externo*”) 10 h após o início da hidratação do cimento e a formação do silicato de cálcio hidratado interno (“*C-S-H interno*”), 14 dias mais tarde.

⁶⁶ CAMPITELI, Vicente C.. **Porosidade do Concreto**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, 1987. 15 p. BT - PCC 09/87.

⁶⁷ AÏTCIN, Pierre-Claude. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Pini, 2000. 667 p. Tradução de: Geraldo G. Serra.

Figura 3.11 – Ilustração representando o desenvolvimento dos compostos hidratados do cimento Portland.



Fonte: Scrivener (1984 *apud* Taylor, 1997), p. 194.

Como a resistência da pasta hidratada do cimento Portland é derivada principalmente das ligações químicas e das forças de atração de Van der Waals⁶⁸, entende-se que quanto mais compactos e menores os cristais dos produtos de hidratação, menor será o volume de poros e maior será a resistência a compressão.

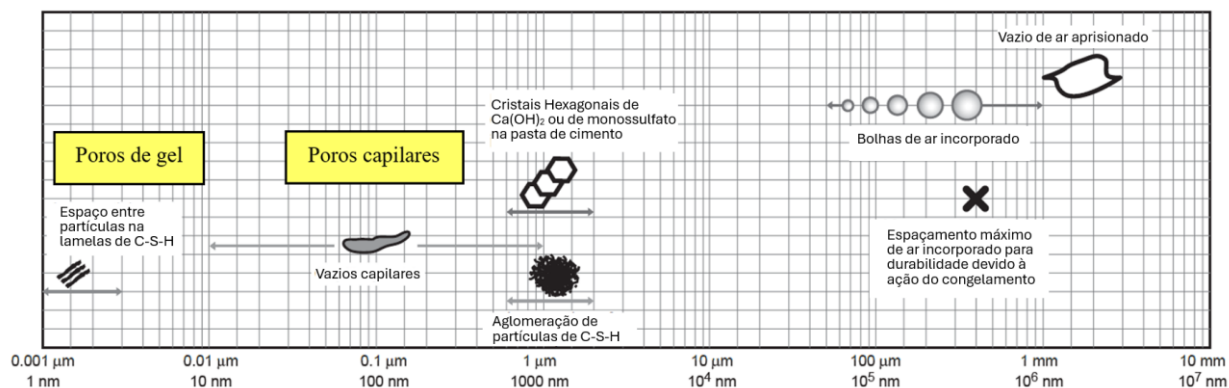
Tango (1990)⁶⁹ concorda com as considerações de Aïctin, Scrivener e Taylor ao chamar o silicato de cálcio hidratado formado nas primeiras idades, ou seja, quando há mais água disponível na mistura, de "*fibras longas de C-S-H*" e em idades mais avançadas, após 10 dias, aproximadamente, de "*fibras curtas de C-S-H*".

É importante registrar que os poros existentes na pasta de cimento hidratada, variam significativamente em tamanho, inclusive, a depender de suas dimensões recebem diferentes classificações, a saber: poros de gel e poros capilares. Sobre este assunto, Mehta e Monteiro (2006), apresentam uma interessante ilustração que permite realizar uma análise comparativa entre os tamanhos dos poros e dos produtos de hidratação, conforme apresentado na Figura 3.12, com a ressalva de que a variação dos tamanhos está representada em escala logarítmica.

⁶⁸ Embora sejam fracas individualmente, estas forças de atração, devido sua natureza ampla e generalizada, desempenham importante contribuição para a resistência do concreto.

⁶⁹ TANGO, Carlos Eduardo de Siqueira. **Um estudo do desenvolvimento da resistência à compressão do concreto de cimento Portland até 50 anos de idade**. 1990. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

Figura 3.12 – Intervalo dimensional dos poros e dos produtos de hidratação presentes na pasta de cimento Portland.



Fonte: Mehta e Monteiro (2006), p. 31.

Entende-se por poros de gel os espaços vazios existentes entre os produtos de hidratação, inclusive espaços vazios interlamelares. Como pode ser observado na Figura 3.12 os diâmetros desses poros são da ordem de 1 nm a 10 nm. Já os poros capilares possuem diâmetros da ordem de 10 nm a 1000 nm, ou seja são 100 vezes maiores. Campiteli (1987) em trabalho publicado na Escola Politécnica da USP, considerou uma classificação equivalente, porém mais detalhada, como apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Classificação dos poros quanto ao tamanho, em pastas de cimento Portland endurecida.

Descrição	Designação	Diâmetro (nm)
Poros grandes	Poros capilares	50 – 1000
Poros médios		10 – 50
Poros pequenos	Poros de gel	2,5 – 10
Microporos		0,5 – 2,5
Microporos interlamelares		0,5

Fonte: Campiteli (1987), p. 4.

De acordo com Coutinho (2006), Mehta e Monteiro (2014) e Andrade e Tutikian (2022)⁷⁰, em geral existe uma relação inversa fundamental entre a resistência à compressão e a porosidade que pode ser descrita da seguinte maneira:

$$f_c = f_{c0} * e^{-k_8 p} \quad (2.7)$$

⁷⁰ ANDRADE, Jairo José de Oliveira; TUTIKIAN, Bernardo F. Resistência Mecânica do Concreto. In: TUTIKIAN, Bernardo; PACHECO, Fernanda; ISAÍIA, Geraldo; BATTAGIN, Inês (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2022. Cap. 17. p. 699-738.

Notar que se trata do modelo de relação fundamental entre porosidade e resistência dos sólidos para materiais homogêneos simples, proposto por Eugene Ryshkewitch em 1953 e apresentado no Capítulo 2 desta dissertação, onde:

f_c : resistência à compressão com porosidade p ;

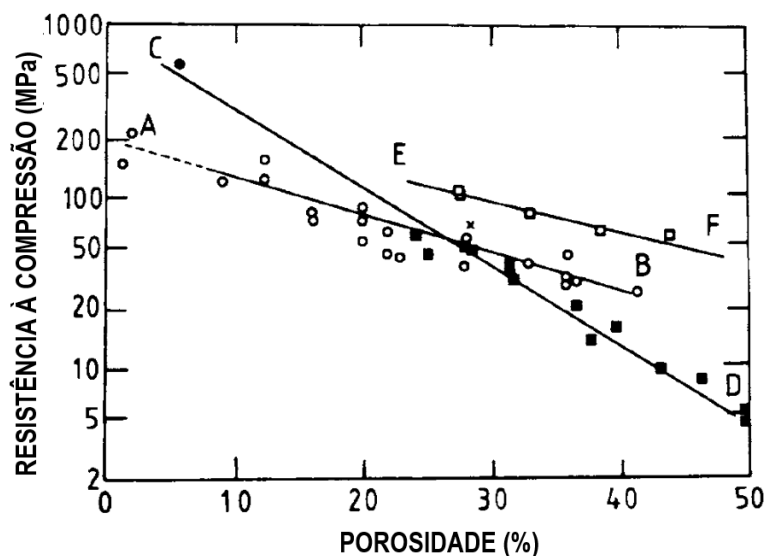
f_{c0} : resistência à compressão com porosidade zero ($p = 0$);

k_8 : constante que depende do material;

p : porosidade.

A Figura 3.13, obtida em Taylor (1997), apresenta graficamente a resistência à compressão em função da porosidade de pastas de cimento Portland curadas em diferentes condições de temperatura e pressão, sendo o segmento de reta A-B correspondente a pasta de cimento Portland, sem adições e submetidos a cura em temperatura ambiente.

Figura 3.13 – Resistência à compressão em função da porosidade de pastas de cimento Portland.



Fonte: Taylor (1997), p. 254.

Nota-se na Figura 3.13 que o eixo das ordenadas, que indica a resistência à compressão em MPa, está representado em escala logarítmica. Sendo assim, de maneira a compatibilizar a Figura 3.13 com a Equação 2.7, faz-se necessário linearizá-la, logo:

$$f_c = f_{c0} * e^{-k_8 p} \rightarrow \ln \frac{f_c}{f_{c0}} = -k_8 * p$$

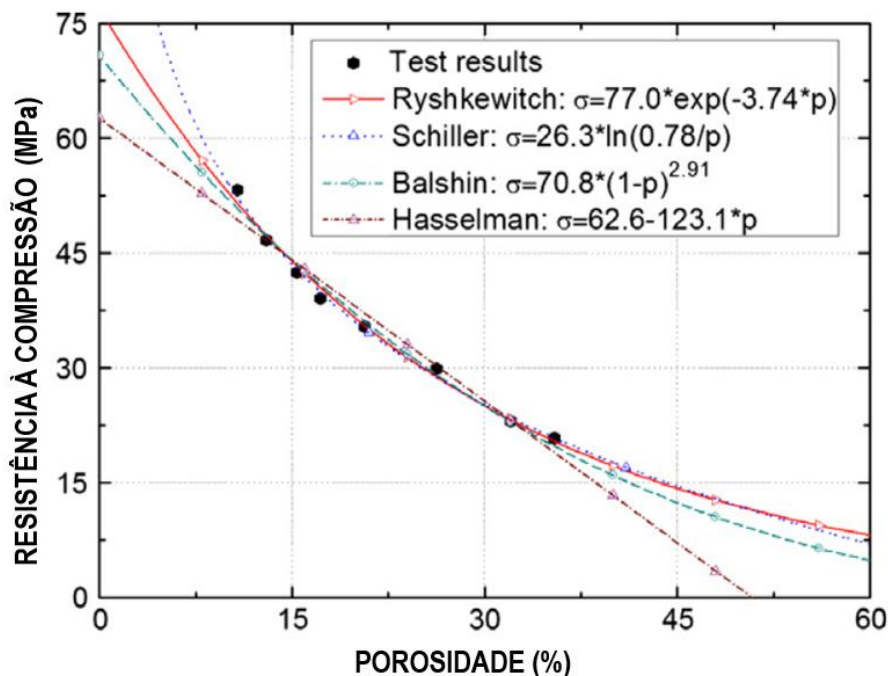
$$\ln f_c = -k_8 * p + \ln f_{c0} \quad (3.11)$$

Portanto, o coeficiente angular da equação linearizada (Equação 3.11) representa a constante k_8 que varia de acordo com as características do material e de cura empregados. No caso do segmento de reta A-B da Figura 3.13, a Equação 2.7 é representada por: $f_c = 200 * e^{-4,9p}$.

Chen, Wu e Zhou (2013)⁷¹, pesquisadores da Universidade de Hohai na China, analisaram a influência da porosidade na resistência à compressão de argamassas à luz dos modelos propostos por Balshin, Ryshkewitch, Hasselmann e Schiller (vide Equações 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9 apresentadas no Capítulo 2 desta dissertação, respectivamente) comparando o desenvolvimento das curvas teóricas com os resultados de ensaios de resistência à compressão de corpos de prova de argamassa, para porosidades variando de 10% a 35%.

A Figura 3.14 apresenta graficamente as curvas de melhor ajuste dos resultados, assim como as expressões teóricas correspondentes.

Figura 3.14 – Gráfico das curvas dos modelos teóricos e resultados de resistência à compressão para porosidades variando de 10% a 35%.



Fonte: Chen, Wu e Zhou (2013), p. 870.

⁷¹ CHEN, X.; WU, S.; ZHOU, J.. Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 40, p. 869-874, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072>.

Os mesmos pesquisadores registraram que o valor da resistência à compressão com porosidade zero (f_{c0}), ou próxima disso, indicadas nas expressões dos modelos teóricos supracitados nem sempre são confiáveis, uma vez que, falhas microscópicas não consideradas nos modelos, podem controlar o mecanismo de ruptura nestas condições. Observações de mesma natureza são feitas por Mehta e Monteiro (1994)⁷², quando da análise da relação resistência/porosidade de concretos, devido à presença de microfissuras e das características particulares da zona de transição, tornando o material complexo demais para relações exatas de resistência/porosidade.

Além da porosidade da pasta de cimento endurecida, que é representada pelo quociente entre o volume de vazios e o volume total do sólido, outra importante questão a ser considerada quando do estudo da resistência à compressão é a água presente na mistura.

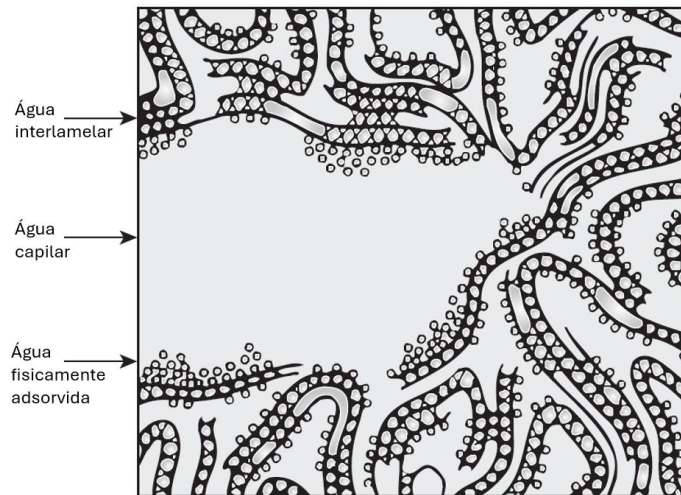
De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a água pode existir na pasta de cimento hidratada em quatro diferentes formas, classificadas de acordo com o grau de dificuldade (ou facilidade) com que ela pode ser removida, são elas:

- ✓ água capilar (“*capillary water*”): presente nos vazios do concreto e livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida;
- ✓ água adsorvida (“*adsorbed water*”): se encontra próxima à superfície sólida dos produtos de hidratação, sob influência das forças de atração;
- ✓ água interlamelar (“*interlayer water*”): associada com a estrutura dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), entre suas camadas;
- ✓ água quimicamente combinada (“*chemically combined water*”): faz parte da microestrutura dos produtos de hidratação do cimento.

A Figura 3.15, baseada no modelo esquemático de Feldman e Sereda (1970, *apud* Mehta e Monteiro, 2006, p. 35) apresenta as diferentes formas de água associadas aos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H).

⁷² MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994. 573 p. Capítulo 3. Tradução e adaptação Prof. Antonio Carmona Filho.

Figura 3.15 – Modelo esquemático das formas de água associadas ao C-S-H.



Fonte: Feldman e Sereda (1970, *apud* Mehta e Monteiro, 2006, p. 35).

A influência da relação água/cimento na resistência à compressão do concreto é um fator de fundamental relevância e foi profundamente estudado por Abrams (1919), que estabeleceu a seguinte equação:

$$f_c = \frac{k_2}{k_3^{w_v/c_v}} \quad (2.2)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão em uma determinada idade;

w_v/c_v : relação água/cimento, em volume;

k_2 e k_3 : coeficientes que dependem da natureza dos materiais, da idade do concreto e das condições de cura.

A influência da relação água/cimento na resistência à compressão também pode ser observada no modelo de Féret proposto em 1892, ou seja, 27 anos antes do modelo de Abrams:

$$f_c = k_1 * \left(\frac{c_v}{c_v + w_v + v_v} \right)^2 \quad (2.1)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão;

c_v : volume absoluto de cimento por unidade de volume de argamassa;

w_v : volume absoluto de água por unidade de volume de argamassa;

v_v : volume absoluto de vazios por unidade de volume de argamassa;

k_1 : constante que depende da natureza dos materiais, da idade e das condições de cura.

Para observar esta influência, implícita no modelo de Féret, basta dividir o numerador e o denominador da Equação 2.1 pelo volume absoluto de cimento (c_v), obtendo-se:

$$f_c = k_1 * \left(\frac{1}{1 + \frac{w_v}{c_v} + \frac{v_v}{c_v}} \right)^2 \quad (3.12)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão;

w_v/c_v : relação água / cimento, em volume;

v_v/c_v : relação volume de vazios / volume de cimento;

k_1 : constante que depende da natureza dos materiais, da idade e das condições de cura.

Logo, também neste caso, quanto menor a relação água/cimento, maior será a resistência à compressão.

Rüsch (1975)⁷³ ao estudar a influência da relação água/cimento na resistência à compressão do concreto, desenvolveu um gráfico de resistência relativa em função da relação água/cimento igual a 0,5 ($w/c = 0,5$) que foi utilizado na época como parâmetro da norma alemã DIN 1164 “Zement mit besonderen Eigenschaften – Zusammensetzung Anforderungen, Übereinstimmungsnachweis” para a determinação de resistências de diversos tipos de cimento, como apresentado na Figura 3.16.

Figura 3.16 - Gráfico da resistência à compressão relativa do concreto em função da variação da relação água/cimento (w/c).



Fonte: Rüsch (1975), p. 34.

⁷³ RÜSCH, Hubert. **Hormigon Armado y Hormigon Pretensado**: propiedades de los materiales y procedimientos de cálculo. Barcelona: Compañía Editorial Continental S. A., 1975. 417 p.

Por fim, ao analisar matematicamente os modelos propostos por Féret e Abrams, no limite, bastaria diminuir a relação água/cimento à valores ínfimos para se obter resistências tão elevadas quando se queira. Evidentemente, isso não acontece na prática, uma vez que existe uma relação água/cimento mínima necessária para a hidratação e que contemple as parcelas de água quimicamente combinada e de gel.

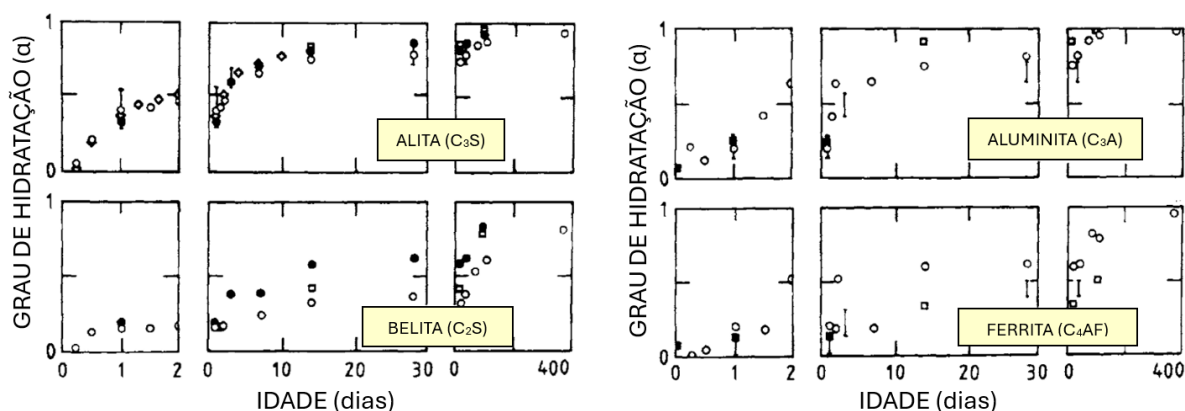
A relação w/c mínima necessária para hidratação pode ser determinada a partir das reações químicas simplificadas de hidratação, do balanceamento estequiométrico e do teor dos principais compostos do cimento anidro analisadas à luz das premissas estabelecidas no modelo de Powers, como detalhado no subitem 4.3 desta dissertação.

3.4 Grau de hidratação (α)

O grau de hidratação do cimento está implicitamente relacionado com o tempo de hidratação, temperatura, finura e teor dos compostos do cimento Portland, sendo que, teoricamente, $\alpha = 0$, no instante inicial da mistura e $\alpha = 1$ em um tempo infinito.

Taylor (1997) ao efetuar análises quantitativas de difração de raio X em amostras de pastas de relação água/cimento igual a 0,65 ($w/c = 0,65$), armazenadas em ambientes com umidade relativa igual a 100%, estudou o grau de hidratação dos principais compostos do cimento em função do tempo. Os resultados obtidos estão apresentados graficamente na Figura 3.17.

Figura 3.17 - Gráfico do grau de hidratação em função da idade para os principais compostos do cimento Portland.



Fonte: Taylor (1997), p. 198.

Observa-se na Figura 3.17 que aos 28 dias de idade, o grau de hidratação dos principais compostos do cimento variou entre 60 e 85%, com média de aproximadamente 70%, ou seja, $\alpha \approx 0,7$.

Xie, Cheng e Wan (2019)⁷⁴ ao estudar a hidratação de pastas produzidas com cimento ASTM tipo I (ASTM 2019), apresentaram graficamente os seguintes valores para o grau de hidratação em função da idade: $\alpha = 54\%$, $\alpha = 62\%$, $\alpha = 70\%$ e $\alpha = 77\%$, para 1, 3, 7 e 28 dias, respectivamente, ou seja, hidratações um pouco mais aceleradas que as observadas pelo Prof. H. F. W Taylor (registradas no parágrafo anterior) e também um pouco acima da faixa do grau de hidratação do cimento aos 28 dias mencionada por Levy e Helene (1996) que é de $0,65 \leq \alpha \leq 0,75$.

Em Tango (1990) é possível encontrar alguns modelos que correlacionam o grau de hidratação com o tempo dentre os quais se destacam, o proposto por Avrami-Erofeyev e o proposto por Knudsen.

O modelo Avrami-Erofeyev foi elaborado com base em estudos prévios em cinética dos processos de hidratação e mudanças de fases, desenvolvidos desde a década de 1940 por M. Avrami; B. V. Erofeyev; K. L. Mampel e por W. Brown *et al.* O modelo é representado matematicamente da seguinte maneira:

$$-\ln(1 - \alpha) = k_{17} * t^{k_{18}} \quad (3.13)$$

Onde:

α : grau de hidratação;

$(1 - \alpha)$: parcela não hidratada;

t : tempo;

k_{17} e k_{18} : constantes.

Já o modelo de Knudsen (1984, *apud* TANGO, 1990, p. 36) foi desenvolvido com base em experimentos que utilizaram a medida da retração química (também conhecida por retração autógena) como índice de hidratação. A equação proposta neste modelo é a seguinte:

$$t = t_d + k_{19} * \left[\frac{\alpha}{(1-\alpha)} \right]^2 \quad (3.14)$$

⁷⁴ XIE, Shasha; CHENG, Zhiyuan; WAN, Li. Hydration And Microstructure Of Astm Type I Cement Paste. **Science And Engineering Of Composite Materials**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 215-220, 1 jan. 2019. <http://dx.doi.org/10.1515/secm-2019-0004>.

Onde:

α : grau de hidratação;

$(1 - \alpha)$: parcela não hidratada;

t : tempo, em dias;

t_d : tempo de dormência, no qual se considera a demora para o início da hidratação, em dias;

k_{19} : constante que considera a finura do cimento, em dias, sendo:

$$k_{19} = \frac{r_0^2}{k_{20}} \quad (3.15)$$

r_0 : parâmetro proporcional a finura do cimento;

k_{20} : constante.

Nota-se que a constante k_{19} , além de associada à finura do cimento (r_0), está vinculada a uma hidratação do cimento igual a 50% ($\alpha = 0,5$), uma vez que, nesta situação, tem-se:

$$t = t_d + k_{19} * \left[\frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \right]^2 \rightarrow t = t_d + k_{19} * \left[\frac{0,5}{(1 - 0,5)} \right]^2 \rightarrow t = t_d + k_{19} * 1 \rightarrow t = t_d + k_{19}$$

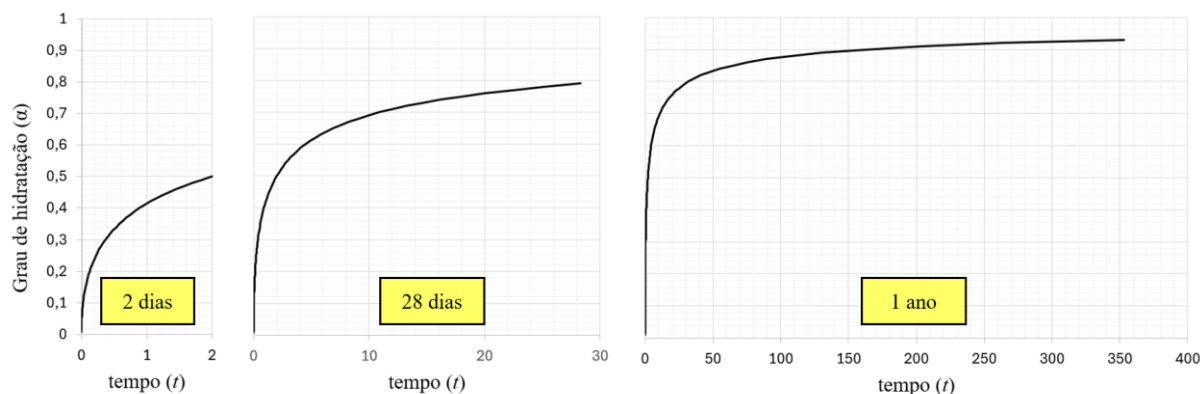
Portanto, a constante k_{19} corresponde ao tempo em dias para que se verifique um grau de hidratação igual a 50% ($\alpha = 0,5$), a contar a partir do início da hidratação, desconsiderando o tempo de dormência (t_d).

O tempo de dormência (t_d) pode ser associado ao tempo de início de pega, de acordo com a ABNT (2018b)⁷⁵ este deve ser igual ou superior a 60 minutos ($\approx 0,04$ dias). Por simplificação, pode-se descartar o coeficiente t_d , dado o pequeno intervalo de tempo a ele atribuído. Ainda, considerando que a hidratação de 50% do cimento anidro ocorre aos 2 dias de idade, tem-se: $t = t_d + k_{19} * \left[\frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \right]^2 \rightarrow t = 2 * \left[\frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \right]^2$.

A Figura 3.18 apresenta graficamente o grau de hidratação em função do tempo para um cimento de constante $k_{19} = 2$ dias.

⁷⁵ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: Abnt, 2018b. 12 p.

Figura 3.18 – Gráfico do grau de hidratação do cimento Portland (α) vs. tempo (t), de acordo com o modelo Knudsen de 1984.



Fonte: Elaborada pelo autor conforme modelo de Knudsen, apresentado em Tango (1990).

Dois anos mais tarde, em 1986, Torben Knudsen, ao dar continuidade em seu trabalho, propôs o seguinte modelo Knudsen (1986, *apud* TANGO, 1990, p. 37).

$$\alpha = \frac{(t - t_{\text{nor}})}{(t - t_{\text{nor}} + t_{50})} \quad (3.16)$$

Onde:

α : grau de hidratação;

t : tempo, em horas;

t_{nor} : período normal, da ordem de 4 a 8 horas;

t_{50} : tempo necessário para se atingir 50% da hidratação total ($\alpha = 0,5$), em horas.

Diante do que foi apresentado, é razoável esperar que o grau de hidratação do cimento Portland varie em função do tempo, de acordo com o tipo e finura do cimento Portland, teor dos principais compostos anidros e disponibilidade de água na mistura. Além disso, a variação de temperatura pode acelerar ou reduzir a taxa de hidratação e, desta maneira, influenciar o grau de hidratação do cimento Portland e, consequentemente, as resistências à compressão de pastas, argamassas e concretos ao longo do tempo.

3.5 Temperatura do concreto

A temperatura do concreto e sua variação exerce importante influência no desenvolvimento da resistência à compressão do material, uma vez que controla o

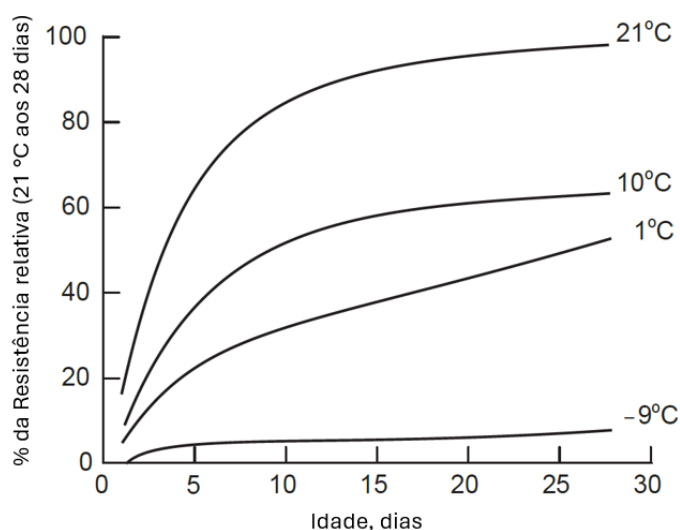
grau de hidratação do cimento. Temperaturas mais altas aceleram as reações químicas de hidratação, contudo, não aumentam as resistências mecânicas finais do material, pelo contrário, diminuem.

Tal comportamento é explicado a partir de estudos da microestrutura do concreto. Durante a hidratação a altas temperaturas, os cristais se desenvolvem mais rapidamente, de maneira desorganizada, implicando em resistência mais elevadas nas primeiras idades, porém mais baixas em idades avançadas, em decorrência da pior distribuição e maior tamanho dos cristais e poros.

Já para o caso de baixas temperaturas, observa-se o contrário, os produtos de hidratação responsáveis pela resistência mecânica do concreto se desenvolvem de maneira mais regular e homogênea na pasta de cimento, implicando em resistências mais baixas nas primeiras idades e maiores em idades avançadas.

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que, em geral, quanto menor a temperatura, menor a resistência até os 28 dias. A uma temperatura próxima ao congelamento, a resistência aos 28 dias é cerca de metade da resistência do concreto a 21°C e quase que não se desenvolve a temperaturas abaixo de zero. Estas afirmações podem ser observadas graficamente na Figura 3.19.

Figura 3.19 – Desenvolvimento relativo da resistência à compressão do concreto em diferentes temperaturas.



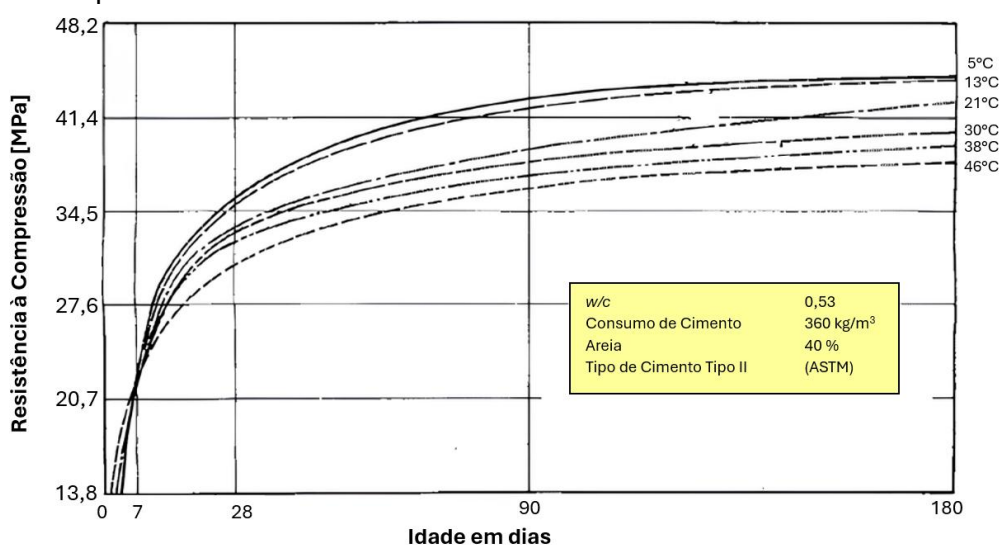
Fonte: Mehta e Monteiro (2006), p. 64.

O gráfico da Figura 3.19 parece explicar o fato de que temperaturas adequadas ($\approx 21^\circ\text{C}$) devem ser mantidas por tempo suficiente até se atingir a energia de ativação necessária para que as reações se iniciem.

Price (1951) em trabalho denominado “*Factors Influencing Concrete Strength*” apresentou estudos que já demonstravam as consequências da variação da temperatura no desenvolvimento de sua resistência à compressão.

O referido estudo submeteu corpos de prova irmãos de concreto a temperaturas iniciais que variaram entre 5°C e 46°C durante 2 h, seguido por cura em temperatura constante a 21°C, até os 180 dias de idade. Os resultados estão apresentados graficamente na Figura 3.20.

Figura 3.20 - Efeito da temperatura inicial no desenvolvimento da resistência à compressão do concreto.



Fonte: Price (1951), p. 422.

Observa-se que os resultados indicaram uma variação da resistência à compressão do concreto, a depender de sua temperatura de cura ($5^{\circ}\text{C} \leq T \leq 46^{\circ}\text{C}$, nas 2 h iniciais). Nas condições do estudo, as maiores resistências nas primeiras idades (correspondentes às maiores temperaturas) sofreram uma inversão aos 7 dias de idade e atingiram menores resistências finais após 6 meses.

Klieger (1958)⁷⁶ em trabalho denominado “*Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength*” ao estudar o efeito de diferentes temperaturas (variando de - 4°C até 50°C) em concretos produzidos com 3 diferentes tipos de cimento observou que, após 1 ano de idade, os concretos submetidos a temperaturas

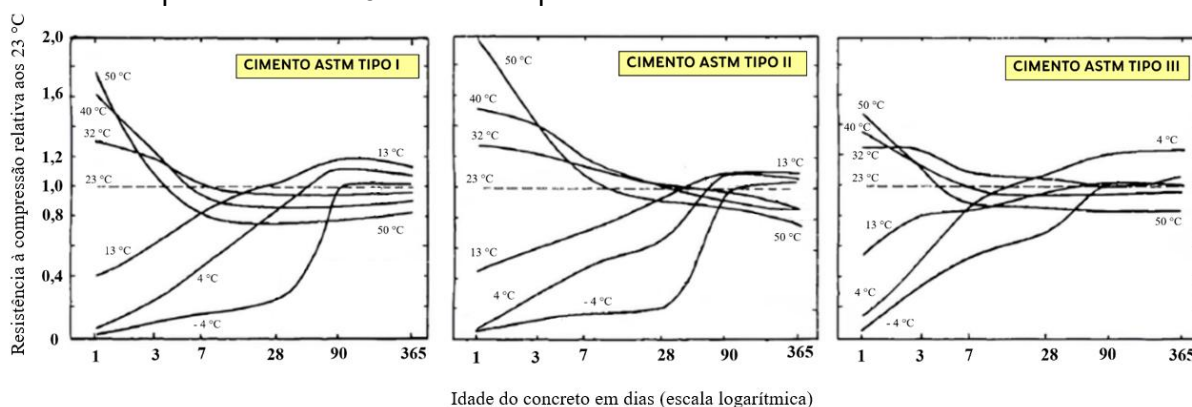
⁷⁶ KLIEGER, Paul. Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength. **Journal Of The American Concrete Institute**, Detroit, v. 29, n. 12, p. 1063-1081, fev. 1958.

mais baixas durante todo este período (4°C a 13°C) apresentaram maiores resistências finais.

Por outro lado, concretos de mesma característica (irmãos), submetidos a elevadas temperaturas desde sua produção, apresentaram resistências mais baixas no final deste período. Ou seja, os resultados obtidos pelo Eng. Paul Klieger corroboram os resultados obtidos pelo Eng. Walter H. Price, sete anos antes.

Os gráficos da Figura 3.21 apresentam quantitativamente as resistências relativas obtidas por Klieger (1958) após 1 ano de idade para os diferentes tipos de cimento considerados, tendo como referência sempre a temperatura de 23°C.

Figura 3.21 - Efeito da temperatura no desenvolvimento da resistência à compressão do concreto produzido com 3 diferentes tipos de cimento.



Fonte: Klieger (1958), p. 1071.

De acordo com Hasparyk *et al.* (2023)⁷⁷, temperaturas superiores a 60°C podem implicar no fenômeno expansivo e deletério do concreto, relacionado com a formação de etringita tardia ou etringita secundária, também conhecido por “*DEF - Delayed Ettringite Formation*”, com fortes implicações na durabilidade das peças de concreto estrutural.

Por fim, é importante registrar que as temperaturas ambiente, de cura e dos insumos utilizados não representam e não devem ser confundidas com a temperatura do concreto, apesar de exercerem importante influência na temperatura deste último. As temperaturas consideradas nos estudos e modelos apresentados nesta dissertação estão associadas à temperatura do concreto, salvo menção distinta.

⁷⁷ HASPARYK, Nicole Pagan. *et al.* **RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS PARA A PREVENÇÃO DA DEF E DA FISSURAÇÃO TÉRMICA NO CONCRETO**. São Paulo: Arte Interativa, 2023. 76 p.

3.6 Influência da duração do carregamento

A influência da carga mantida, também conhecida por carga de longa duração e seus efeitos na resistência à compressão do concreto foi estudada na década de 1960 pelo Eng. Hubert Rüsch, então diretor do Laboratório de Engenharia de Materiais da Universidade Técnica de Munique.

No referido estudo, denominado *“Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete”*, Rüsch (1960)⁷⁸ ao relacionar as resistências à compressão de corpos de prova irmãos obtidas quando da aplicação de cargas de longa duração com as resistências obtidas em ensaios rápidos observou que no primeiro caso, os resultados eram significativamente menores. Ou seja, os corpos de prova submetidos aos ensaios lentos rompiam com cargas mais baixas, independentemente da data de aplicação da carga mantida.

Este assunto também foi abordado no Brasil dois anos mais tarde, em 1962, pelo Prof. Antonio Carlos Reis Laranjeiras ao publicar um artigo denominado *“Conhecimentos sobre as relações entre tensões e deformações nos concretos”* na Revista Técnica Estrutura das Construções (1962)⁷⁹.

Quantitativamente, os resultados apresentados no trabalho de Rüsch (1960) mostraram que a resistência à carga mantida de um corpo de prova de concreto pode, a longo prazo, representar de 80% a 75% da resistência determinada em um ensaio padronizado de curta duração, ou seja, reduzir em até 25% do seu valor, em relação à resistência em condições relaxadas.

A explicação para este comportamento é a propagação interna de microfissuras, que se manifestam na microestrutura do concreto, tanto na zona de transição como na matriz da pasta de cimento, sob o efeito de tensões permanentes resultando na diminuição da resistência.

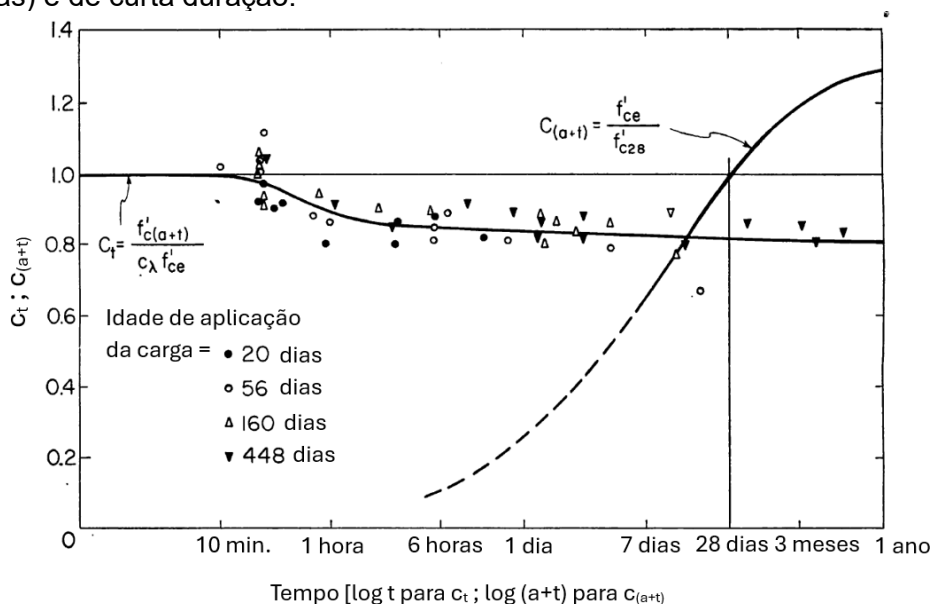
Os resultados obtidos estão apresentados graficamente na Figura 3.22, onde a função c_t representa o decréscimo da resistência devido à carga mantida. Nota-se que após 1 ano da aplicação da carga mantida o valor de $c_t = 0,8$ e que o fenômeno de

⁷⁸ RÜSCH, H.. Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete. **Journal Of The American Concrete Institute**, Detroit, v. 57, n. 1, jul. 1960. 28p.

⁷⁹ **REVISTA TÉCNICA ESTRUTURA DAS CONSTRUÇÕES**. Rio de Janeiro: Revista Editada Pelo Professor Aderson Moreira da Rocha, n. 47, 1962.

decréscimo da resistência começa a se manifestar de maneira tênue 10 minutos após a aplicação da carga de longa duração e que, aproximadamente 20 minutos depois, a perda de resistência já é significativa.

Figura 3.22 - Relação entre resistências à compressão obtidas em ensaios lentos (cargas mantidas) e de curta duração.



Fonte: Rüsç (1960), p.17.

Fouré e Bronsart (1990, *apud* Cunha e Angelo, 2003, p. 6)⁸⁰, com base em estudos experimentais sobre o tema realizados na França nos anos de 70 e 80, apresentaram uma expressão para representar o decréscimo da resistência devido à carga mantida, dada por:

$$c_t = 0,92 - 0,03 \log (t - t_0) \quad (3.17)$$

Onde:

c_t : função que representa a diminuição da resistência ao longo do tempo em decorrência da carga mantida, adimensional.

t : tempo, em minutos.

t_0 : idade de carregamento do concreto, em minutos.

$(t - t_0)$: tempo de carga mantida, em minutos.

⁸⁰ CUNHA, José Celso da; ANGELO, Ana Margarida Viera. Contribuição para a determinação da resistência do concreto na análise de estruturas periciadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÃO E PERÍCIAS, 12., 2003, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: Ibape, 2003. p. 1-15.

Segundo esse modelo, para um carregamento com duração de 50 anos, obter-se-ia uma redução de resistência da ordem de 30%, ou seja, $c_t = 0,7$, superior aos 25% (0,75) proposto por Rüschi. Também, sabe-se que o efeito da carga mantida não se manifesta, significativamente, antes de uns 15 a 20 minutos, a contar do início do carregamento. No entanto esse modelo de Fouré e Bronsart conduz a uma redução de 8%, 1 minuto após a aplicação da carga mantida. Por essas e outras razões este modelo não foi adotado nem consagrado universalmente.

O modelo proposto pelo CEB-FIP Model Code 1990 (CEB, 1993)⁸¹, em seu subitem 2.1.6.2 “*Strength under sustained loads*” é bem mais adequado às pesquisas de Rüschi. O modelo proposto no código modelo de 1990 foi largamente utilizado em análises desta natureza e é representado pela seguinte expressão:

$$c_t = \beta_{c,sus}(t, t_0) = 0,96 - 0,12 \left\{ \ln \left[72 \left(\frac{t-t_0}{t_1} \right) \right] \right\}^{1/4} \quad (3.18)$$

Onde:

$c_t = \beta_{c,sus}(t, t_0)$: função que representa a diminuição da resistência ao longo do tempo em decorrência da carga mantida. Válida para $(t - t_0) > 0,015$ dias ($\approx$ 20 minutos), adimensional.

t : tempo, em dias.

t_0 : idade de carregamento do concreto, em dias.

$(t - t_0)$: tempo de carga mantida, em dias.

t_1 : 1 dia.

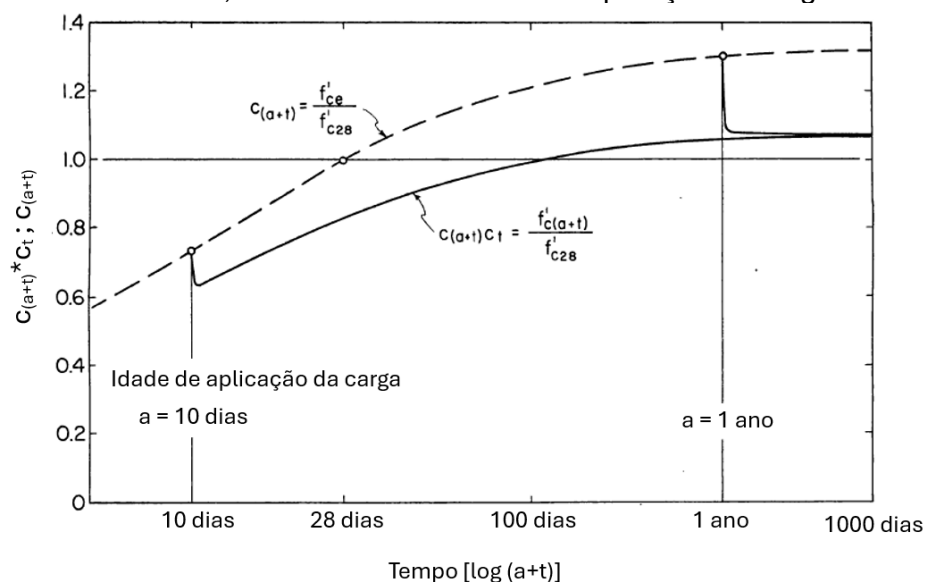
Portanto, à luz do CEB-FIP Model Code 1990, para idades avançadas (50 anos), onde $t \gg t_0$, c_t assume valor de 0,73, independente da data de aplicação da carga ($7 \text{ dias} \leq t_0 \leq 1 \text{ ano}$). Para cargas aplicadas aos 28 dias, 20 minutos após o carregamento, c_t assume o valor aproximado de 0,80.

Para melhor entendimento da influência da carga mantida na resistência à compressão do concreto, Rüschi (1960) propôs o estudo combinado dos dois efeitos,

⁸¹ COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON. **1990**: CEB-FIP MODEL CODE 1990 DESIGN CODE. Lausanne: CEB-FIP, 1993. 437 p.

considerando também o aumento relativo da resistência do concreto com o tempo, conforme Figura 3.23.

Figura 3.23 - Efeito combinado do crescimento e do decréscimo relativos da resistência à compressão do concreto, de acordo com a idade de aplicação da carga mantida.



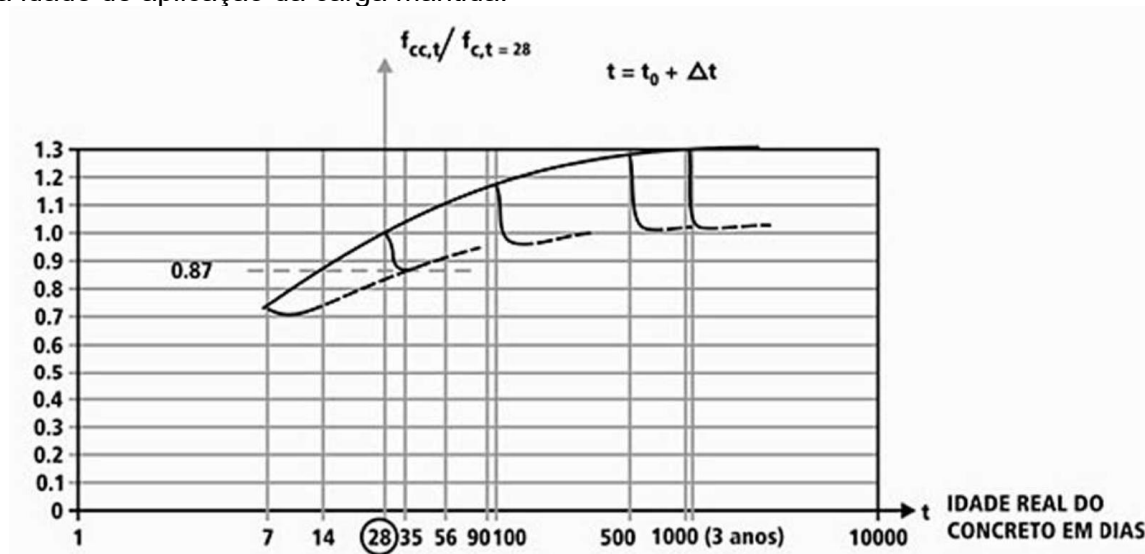
Fonte: Rüsch (1960), p. 18.

Observa-se que o efeito combinado do crescimento e do decréscimo relativos da resistência está associado ao produto de duas funções distintas e independentes a saber: a primeira, indicada na Figura 3.23 pela linha tracejada e dada pela função denominada $c_{(a+t)}$; a segunda (associada ao decréscimo da resistência) está representada pela função c_t . O produto das duas funções ($c_{(a+t)} * c_t$) está representado pela linha contínua na Figura 3.23, para cargas aplicadas aos 10 dias e 1 ano.

Ainda, analisando a Figura 3.23, nota-se que independentemente da data de aplicação da carga mantida, o efeito combinado do crescimento e do decréscimo relativos da resistência (indicado pelas linhas contínuas no gráfico) converge, em idades avançadas, para um mesmo valor, no caso o produto $c_{(a+t)} * c_t = f'_{c(a+t)} / f'_{c28} \approx 1,07$, aproximadamente, para a idade de 1000 dias (2,7 anos). Isto significa dizer que, considerando o efeito combinado do crescimento e decréscimo da resistência, na idade de 2,7 anos a resistência do concreto é da ordem de 7% maior que aos 28 dias, para qualquer data de aplicação da carga mantida.

Fusco (2008)⁸², ao analisar curvas de crescimento da resistência à compressão de concretos produzidos com cimento Portland de endurecimento normal e o efeito combinado da carga mantida registrou as mesmas conclusões, como indicado na Figura 3.24.

Figura 3.24 - Efeito combinado do crescimento e do decréscimo relativos da resistência à compressão do concreto produzido com cimento de endurecimento normal, de acordo com a idade de aplicação da carga mantida.



Fonte: Fusco (2008), p.132.

Observa-se na Figura 3.24 que o valor de $f_{cc,t} / f_{c,t=28}$ (que equivale a razão $f'_{c(a+t)} / f'_{c28}$ indicada na Figura 3.23) é de aproximadamente 1,02, na idade de 1000 dias, para qualquer data de aplicação da carga mantida (7, 28, 100 ou 500 dias). Ou seja, novamente, o efeito combinado do crescimento e decréscimo da resistência converge para um valor comum em idades avançadas.

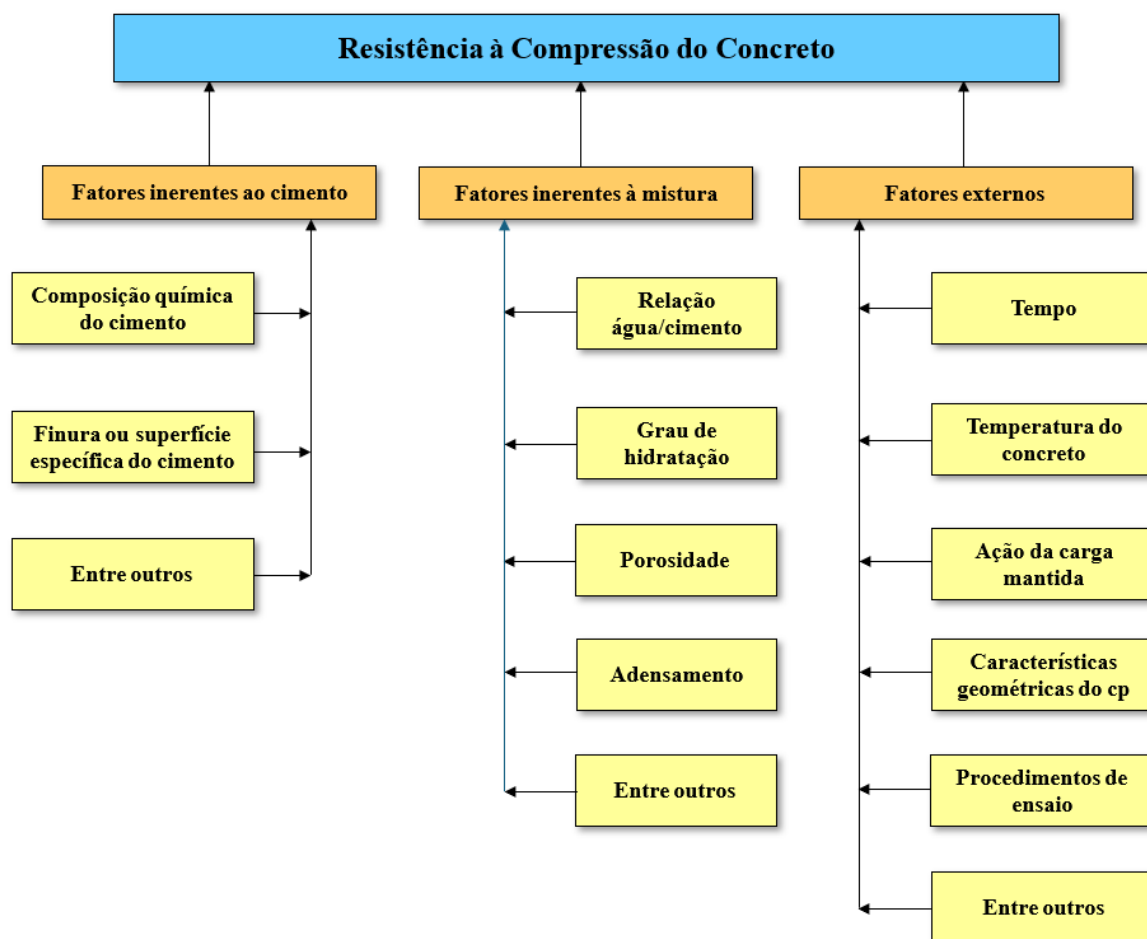
Ainda, no que se refere ao efeito combinado do crescimento e decréscimo da resistência ($c_{(a+t)} * c_t$), a diferença observada entre os valores registrados por Rüsçh (1960) e Fusco (2008) aos 1000 dias de idade (1,07 e 1,02, respectivamente) pode ser explicada devido à curva de crescimento da resistência utilizada, que por sua vez, pode assumir valores distintos ao longo do tempo, a depender do modelo teórico adotado, do tipo de cimento e de outros parâmetros.

⁸² FUSCO, Pérciles Brasiliense. **Tecnologia do Concreto Estrutural**: tópicos aplicados. São Paulo: Pini, 2008. 179 p.

3.7 Considerações gerais sobre os fatores intervenientes na resistência à compressão

Diante do que foi abordado neste capítulo, é fundamental entender que existem inúmeros fatores que interferem no desenvolvimento da resistência à compressão do concreto, inerentes ou não ao material. Estes fatores, apresentados na Figura 3.25, também são variáveis (como detalhado nos subitens anteriores) e atuam de maneira conjunta, aumentando a complexidade e explicando a variabilidade desta propriedade mecânica.

Figura 3.25 – Fatores intervenientes na resistência à compressão do concreto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

No próximo capítulo desta dissertação, busca-se representar a influência destes fatores por meio de modelos teóricos consagrados de comportamento da resistência à compressão.

4 MODELOS DE COMPORTAMENTO DA RESISTÊNCIA

Neste capítulo são estudados em profundidade os principais modelos teóricos de comportamento da resistência à compressão do concreto, correlacionando-os.

4.1 Modelo de Féret

Em 1892 na França, René Féret realizou vários estudos sobre a influência do consumo de cimento, quantidade de água, granulometria e compactação das areias nas resistências de argamassas (BAUER, NORONHA, SILVA e MOTTA, 2025)⁸³. Estes estudos resultaram na publicação de um importante trabalho sobre o tema denominado “*Essais de divers sables pour mortiers*” onde Féret propunha a utilização da Equação 4.1 para determinação da resistência à compressão do material (HELENE, 1987).

$$f_c = k_1 * \left(\frac{c_v}{1-M} \right)^2 \quad (4.1)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão;

c_v : volume absoluto de cimento por unidade de volume de argamassa;

M : volume absoluto de agregado miúdo por unidade de volume de argamassa;

k_1 : constante que depende da natureza dos materiais, da idade e das condições de cura.

Considerando os volumes absolutos de cimento, água e vazios por unidade de volume de argamassa, tem-se:

$$c_v + w_v + v_v + M = 1 \rightarrow (1 - M) = c_v + w_v + v_v$$

Logo, a Equação 4.1 proposta por Féret pode ser reescrita como apresentada no Capítulo 2, ou seja, da seguinte maneira:

⁸³ BAUER, L. A. Falcão; NORONHA, Maria Aparecida de Azevedo; SILVA, Turibio José da; MOTTA, Leila Aparecida de Castro. DOSAGEM DO CONCRETO. In: BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2025. Cap. 6. p. 125-170.

$$f_c = k_1 * \left(\frac{c_v}{c_v + w_v + v_v} \right)^2 \quad (2.1)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão;

c_v : volume de absoluto de cimento por unidade de volume de argamassa;

w_v : volume absoluto de água por unidade de volume de argamassa;

v_v : volume absoluto de vazios por unidade de volume de argamassa;

k_1 : constante que depende da natureza dos materiais, da idade e das condições de cura.

É interessante observar a semelhança entre os modelos propostos por Féret em 1892 (Equação 2.1) e o modelo proposto 55 anos depois por Powers (Equações 2.4 e 2.5), este último mais refinado e preciso, uma vez que leva em conta o grau de hidratação do cimento. Por meio da análise do modelo proposto por Féret, apresentado na Equação 2.1, nota-se que, para um volume ínfimo de vazios ($v_v \approx 0$), pode-se admitir, no limite, que a referida equação assume o seguinte formato:

$$f_c = k_1 * \left(\frac{c_v}{c_v + w_v + v_v} \right)^2 \rightarrow f_c = k_1 * \left(\frac{c_v}{c_v + w_v + 0} \right)^2 \rightarrow f_c = k_1 * \left(\frac{c_v}{c_v + w_v} \right)^2$$

Ainda, por meio da transformação de unidade de volume para unidade de massa, considerando a massa específica do cimento igual a 3,15 g/cm³ ($c = c_v * 3,15$) e a da água igual a 1,00 g/cm³ ($w = w_v * 1,00$), obtém-se:

$$f_c = k_1 * \left(\frac{c_v}{c_v + w_v} \right)^2 \rightarrow f_c = k_1 * \left(\frac{c/3,15}{c/3,15 + w/1,00} \right)^2 \rightarrow f_c = k_1 * \left(\frac{0,32 * c}{0,32 * c + w} \right)^2$$

$$f_c = k_1 * \left(\frac{0,32}{0,32 + \frac{w}{c}} \right)^2 \quad (4.2)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão;

w/c : relação água/cimento, em massa;

k_1 : constante que depende da natureza dos materiais, da idade e das condições de cura.

Registra-se que Petrucci (1968), durante estudo da variação das propriedades fundamentais do concreto endurecido com o fator água/cimento, dentre outras

considerações, propôs para concretos bem adensados e de trabalhabilidade satisfatória, a utilização da Equação 4.2 para representar o modelo de Féret.

Para efeito de análise comparativa com o modelo de Powers, a mesma equação pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
 f_c &= k_1 * \left(\frac{0,32}{0,32 + \frac{w}{c}} \right)^2 \rightarrow f_c = k_1 * \left(\frac{0,32}{0,32 + \frac{w}{c}} \right) * \left(\frac{0,32}{0,32 + \frac{w}{c}} \right) \\
 f_c &= \frac{k_1}{2,125 * 2,125} * \left(\frac{2,125 * 0,32}{0,32 + \frac{w}{c}} \right) * \left(\frac{2,125 * 0,32}{0,32 + \frac{w}{c}} \right) \rightarrow f_c = k'_1 * \left(\frac{0,68}{0,32 + \frac{w}{c}} \right) * \left(\frac{0,68}{0,32 + \frac{w}{c}} \right) \\
 f_c &= k'_1 * \left(\frac{0,68}{0,32 + \frac{w}{c}} \right)^2 \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

Portanto, nas seguintes condições de contorno: admitindo para o modelo de Féret um volume de vazios próximo de zero ($v_v \approx 0$) e para o modelo de Powers uma hidratação completa do cimento ($\alpha = 1$), os modelos se igualam, desde que as constantes do modelo de Powers apresentadas na Equação 2.4 (k_5 e k_6), sejam iguais a: $k_5 = k'_1 = \frac{k_1}{2,125 * 2,125} = 0,22 * k_1$ e $k_6 = 2$.

4.2 Modelo de Abrams

Entre os anos de 1914 e 1918, Duff Andrew Abrams, Professor chefe do Laboratório do Instituto Lewis, em Chicago realizou mais de 50.000 ensaios de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto (15 cm x 30 cm), argamassa e pasta. Os resultados foram inicialmente apresentados em dezembro de 1918, em reunião da Portland Cement Association - PCA, realizada na cidade de Nova York e na sequência publicados em trabalho técnico denominado “*Design of Concrete Mixtures*” (ABRAMS, 1919).

No estudo em questão foi constatado que a resistência à compressão do concreto é inversa e exponencialmente proporcional a relação água/cimento, de acordo com a Equação 2.2.

$$f_c = \frac{k_2}{k_3^{w_v/c_v}} \quad (2.2)$$

Onde:

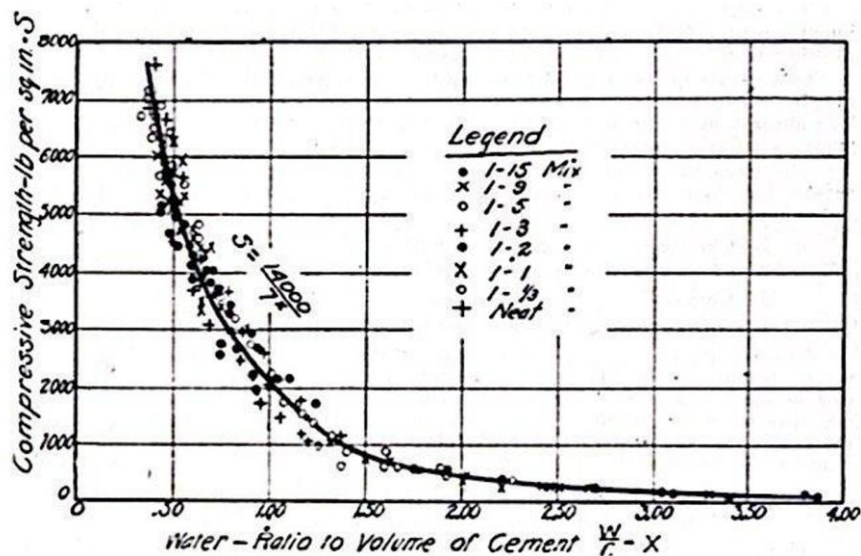
f_c : resistência à compressão em uma determinada idade;

w_v/c_v : relação água/cimento, em volume;

k_2 e k_3 : coeficientes que dependem da natureza dos materiais, da idade do concreto e das condições de cura.

A Figura 4.1 apresenta graficamente os resultados obtidos por Abrams (1919) para diferentes misturas de concreto, argamassa e pasta. Registra-se que para relações $w_v/c_v < 0,5$ apresentadas na referida figura em volume, Abrams só conseguiu produzir argamassas ricas em cimento ou pasta, uma vez que não existiam aditivos superplastificantes e a trabalhabilidade só era obtida com o uso de muita pasta (THOMAZ, 2024b)⁸⁴.

Figura 4.1 - Gráfico da resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade vs. relação água/cimento em volume (w_v/c_v).



Fonte: Abrams (1919), p. 3.

Conforme mencionado, Abrams realizou os estudos considerando a relação água/cimento em volume (w_v/c_v). Além disso, foi utilizado um cimento de massa unitária de 94 lb/ft³, o que corresponde a:

$$94 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} = 94 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} * \frac{0,453592 \text{ kg}}{1 \text{ lb}} * \frac{1 \text{ ft}^3}{0,0283168 \text{ m}^3} = 1505,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1,50 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

⁸⁴ THOMAZ, Eduardo C. S.. **Notas de Aula IME - Instituto Militar de Engenharia**: dosagem do concreto. Dosagem do Concreto. Disponível em: http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/pad_cimentos.htm. Acesso em: 30 jun. 2024b.

Desta maneira, tem-se:

- ✓ para a massa de cimento: $c = c_v * 1,50$, uma vez que Abrams considerava a massa unitária do cimento $94 \text{ lb/ft}^3 = 1,50 \text{ g/cm}^3$;
- ✓ para a massa da água: $w = w_v * 1,00$, uma vez que a massa específica da água é igual a $1,00 \text{ g/cm}^3$.

Portanto, torna-se possível reescrever a Equação 2.2 em função da relação água/cimento em massa (w/c), como usualmente empregado na atualidade, da seguinte maneira:

$$f_c = \frac{k_2}{k_3^{w/c}} \rightarrow f_c = \frac{k_2}{\frac{w * \frac{1}{1,00}}{k_3^{c * \frac{1}{1,50}}}} \rightarrow f_c = \frac{k_2}{k_3^{1,5 * \frac{w}{c}}} \rightarrow f_c = \frac{k_2}{[k_3^{1,5}]^{w/c}}$$

Sendo $k_{21} = k_3^{1,5}$, tem-se:

$$f_c = \frac{k_2}{k_{21}^{w/c}} \quad (4.4)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão em uma determinada idade;

w/c : relação água/cimento, em massa;

k_2 e k_{21} : coeficientes que dependem da natureza dos materiais, da idade do concreto e das condições de cura.

De acordo com Helene e Terzian (1992), o estudo de Abrams pode ser considerado como uma das maiores contribuições relacionadas ao tema. Esse modelo matemático, popularmente conhecido como “*Lei de Abrams*”, se mostrou perfeitamente válido, sem necessidade de ajustes e é empregado até os dias atuais, sempre que: os agregados sejam de elevada resistência à compressão ($\geq 80 \text{ MPa}$), a quantidade de pasta de cimento seja suficiente para preencher os vazios entre os agregados e o concreto, em seu estado fresco, seja plástico e esteja perfeitamente adensado.

Helene (1987), por meio do modelo de Abrams, realizou um extenso estudo onde estabeleceu a correlação da resistência à compressão (aos 3, 7, 28 e 91 dias de idade) com a relação água/cimento (w/c), utilizando cimentos nacionais da época (CP 32, AF 32, POZ 32, CP 25, AF 25 e POZ 25), obtendo os valores dos coeficientes k_2 e k_{21} e gerando um importante banco de dados para os referidos cimentos e demais variáveis envolvidas.

Ainda, com base no modelo de Abrams, a partir da Equação 4.4, é possível correlacionar a resistência de um mesmo traço de concreto em diferentes idades e, desta maneira, estimar a resistência em idades futuras. Para tanto, sendo f_c' e f_c'' as resistências do mesmo traço de concreto em diferentes idades, tem-se:

$$f_c' = \frac{k_2'}{k_{21}'^{w/c}} \quad \text{e} \quad f_c'' = \frac{k_2''}{k_{21}''^{w/c}}$$

Por meio da razão f_c'/f_c'' :

$$f_c' = \frac{k_2'}{k_2''} * \left(\frac{k_{21}''}{k_{21}'} \right)^{w/c} * f_c''$$

Sendo: $k_{22} = \frac{k_2'}{k_2''}$ e $k_{23} = \frac{k_{21}''}{k_{21}'}$, tem-se:

$$f_c' = k_{22} * k_{23}^{w/c} * f_c'' \quad (4.5)$$

Onde:

f_c' : resistência à compressão em uma determinada idade, em MPa;

f_c'' : resistência à compressão em uma idade diferente de f_c' , em MPa;

k_{22} e k_{23} : constantes que dependem da natureza dos materiais, das condições de cura e da idade do concreto. Nota-se que para uma mesma idade do concreto ($f_c' = f_c''$), tem-se: $k_{22} = k_{23} = 1$;

$k_{22} * k_{23}^{w/c}$: crescimento ou decréscimo percentual da resistência em relação as idades consideradas.

Registra-se também que existe outra maneira de correlacionar a resistências em diferentes idades de concretos de mesma relação w/c , a partir da Equação 4.4. Sendo, novamente, f_c' e f_c'' as resistências do mesmo concreto em diferentes idades, tem-se:

$$f_c' = \frac{k_2'}{k_{21}'^{w/c}} \rightarrow k_{21}'^{w/c} = \frac{k_2'}{f_c'} \rightarrow \log k_{21}'^{w/c} = \log \frac{k_2'}{f_c'} \rightarrow \frac{w}{c} \log k_{21}' = \log k_2' - \log f_c'$$

$$\frac{w}{c} = \frac{\log k_2' - \log f_c'}{\log k_{21}'} \quad (4.6)$$

Para f_c'' , obtém-se analogamente:

$$\frac{w}{c} = \frac{\log k_2'' - \log f_c''}{\log k_{21}''} \quad (4.7)$$

Como se trata da mesma relação w/c , é possível igualar as Equações 4.6 e 4.7 e, portanto, obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{\log k_2' - \log f_c'}{\log k_{21}'} &= \frac{\log k_2'' - \log f_c''}{\log k_{21}''} \rightarrow \frac{\log \frac{k_2'}{f_c'}}{\log k_{21}'} = \frac{\log \frac{k_2''}{f_c''}}{\log k_{21}''} \rightarrow \frac{\log k_{21}'}{\log k_{21}''} * \log \frac{k_2''}{f_c''} = \log \frac{k_2'}{f_c'} \\ \log \frac{k_2''^{\frac{\log k_{21}'}{\log k_{21}''}}}{f_c''} &= \log \frac{k_2'}{f_c'} \rightarrow \frac{k_2''^{\frac{\log k_{21}'}{\log k_{21}''}}}{f_c''} = \frac{k_2'}{f_c'} \rightarrow f_c' = \frac{k_2'}{k_2''^{\frac{\log k_{21}'}{\log k_{21}''}}} * f_c''^{\frac{\log k_{21}'}{\log k_{21}''}} \end{aligned}$$

Sendo: $k_{24} = \frac{\log k_{21}'}{\log k_{21}''}$ e $k_{25} = \frac{k_2'}{k_2''^{\frac{\log k_{21}'}{\log k_{21}''}}} = \frac{k_2'}{k_2''^{k_{24}}}$, tem-se:

$$f_c' = k_{25} * f_c''^{k_{24}} \quad (4.8)$$

Onde:

f_c' : resistência à compressão em uma determinada idade, em MPa;

f_c'' : resistência à compressão em uma idade diferente de f_c' , em MPa;

k_{24} e k_{25} : constantes que dependem da natureza dos materiais, das condições de cura e da idade do concreto. Nota-se que para uma mesma idade do concreto ($f_c' = f_c''$), tem-se: $k_{24} = k_{25} = 1$.

Amaral Filho (1945)⁸⁵ em trabalho denominado “*Estudo da previsão da resistência à compressão dos concretos*” desenvolvido na Seção de Aglomerantes e Concretos do IPT, ao realizar mais de 3.300 ensaios de ruptura de corpos de prova entre janeiro de 1939 e janeiro de 1943, estabeleceu correlações para a determinação da resistência à compressão aos 28 dias de idade a partir de resistências aos 3 e 7 dias para diversos traços, por meio da Equação 4.8, obtendo como valor médio:

⁸⁵ AMARAL FILHO, Epaminondas Melo do.. Estudo da previsão da resistência à compressão dos concretos. **Revista Politécnica**, São Paulo, n. 146, p. 345-354, mai. 1945.

$f_{c(28)} = 4,17 * f_{c(7)}^{0,795}$ e $f_{c(28)} = 12,36 * f_{c(3)}^{0,639}$, com erro de 20%, sendo $f_{c(3)}$, $f_{c(7)}$ e $f_{c(28)}$, resistências à compressão dadas em kgf/cm².

Tango (1983) realizou estudo de mesma natureza, entretanto, bem mais amplo, uma vez que envolveu concretos produzidos entre os anos de 1957 e 1979. No estudo em questão, a resistência à compressão aos 28 dias de idade foi determinada teoricamente com base em resistências aos 2, 3 e 7 dias. Neste caso, foi utilizada a Equação 4.8 com os coeficientes k_{24} e k_{25} , ajustados de acordo com as idades estudadas e obtidos em concretos produzidos no mês anterior. Os resultados teóricos foram comparados com os resultados da ruptura dos corpos de prova. Observou-se erros percentuais de aproximadamente 25, 20 e 15%, para os resultados obtidos a partir das idades 2, 3 e 7 dias, respectivamente.

4.3 Modelo de Powers

No ano de 1947, T. C. Powers e T. L. Brownyard publicaram estudos que indicavam que resistências à compressão de pastas de cimento poderiam ser obtidas por meio da razão entre o volume dos produtos de hidratação do cimento e o espaço total disponível no sistema.

Tal razão corresponde à conhecida relação gel/espaço (g) que, por sua vez, está relacionada com a resistência à compressão por meio de uma equação do tipo:

$$f_c = k_5 * g^{k_6} \quad (2.4)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão, em MPa;

k_5 : coeficiente que representa a resistência à compressão, em MPa.

k_6 : coeficiente adimensional.

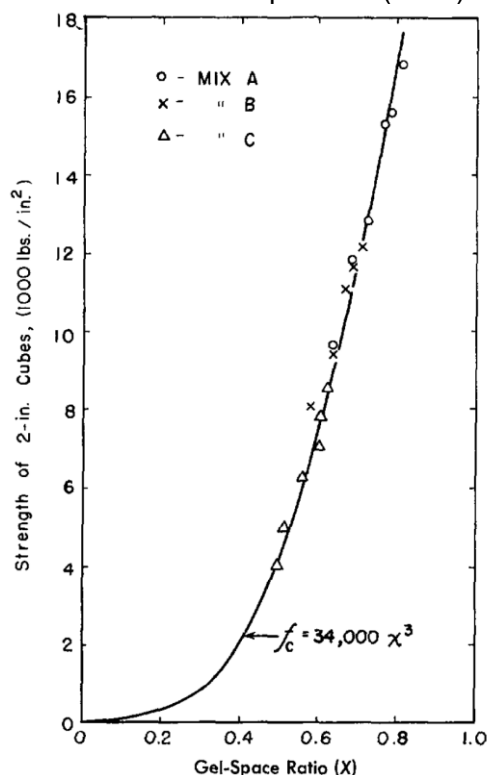
g : relação gel/espaço.

Posteriormente, Powers (1958)⁸⁶, dando sequência aos estudos, ao analisar o desenvolvimento da resistência à compressão de três diferentes misturas de

⁸⁶ POWERS, T. C.. Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. STP – Special Technical Publication. **Journal of The American Ceramic Society**, Chicago, v. 41, p. 1-6, mar. 1958.

argamassas, demonstrou que esta cresce a uma razão cúbica ($k_6 = 3$), à medida que o valor da relação gel/espaco aumenta, conforme apresentado no gráfico da Figura 4.2.

Figura 4.2 – Resistência à compressão (lb/in²) vs. relação gel/espaco.



Fonte: Powers (1958), p. 3.

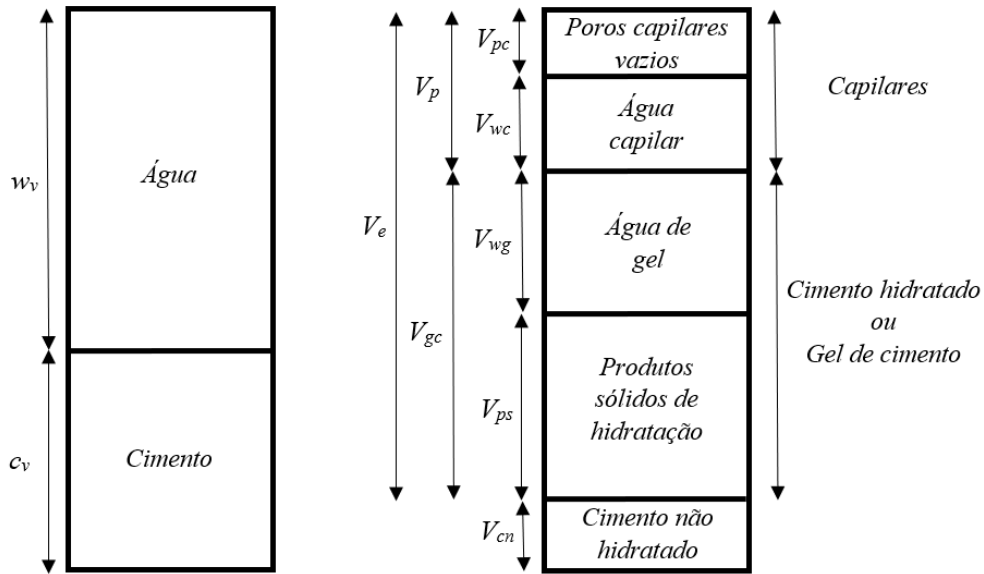
Registra-se que a equação que representa o crescimento da resistência em função da relação gel/espaco determinada por Powers e apresentada na Figura 4.2 em lb/in² ($f_c = 34.000 * x^3$) também pode ser escrita em MPa, ou seja: $f_c = 234 * g^3$.

Para melhor entendimento do modelo de Powers, faz-se necessário apresentá-lo de maneira mais detalhada. Salienta-se que a relação gel/espaco (g) pode ser correlacionada com o grau de hidratação do cimento (α) e com a relação água/cimento do traço (w/c). Esta correlação pode ser deduzida a partir das proporções volumétricas dos constituintes da pasta de cimento, como indicado na Figura 4.3, adaptada de Neville e Brooks (2010)⁸⁷ e de Brouwers (2011)⁸⁸, que apresenta essas proporções antes e durante o processo de hidratação do cimento.

⁸⁷ NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. **Concrete Technology**. 2. ed. London: Pearson, 2010. 442 p.

⁸⁸ BROUWERS, H. J. H.. **A Hydration Model of Portland Cement**: using the work of powers and brownnyard. Eindhoven: Tu/e, 2011. 154 p.

Figura 4.3 – Representação esquemática das proporções volumétricas antes da hidratação do cimento (à esquerda) e durante a hidratação do cimento (à direita).



Fonte: Neville e Brooks (2010), p. 101; Brouwers (2011), p. 5.

Como estabelecido por Powers, a relação gel/espço (g) é definida como a relação entre o volume de gel de cimento (V_{gc}) e a soma dos volumes de gel de cimento (V_{gc}) e de poros capilares (V_p), dada por:

$$g = \frac{V_{gc}}{V_{gc} + V_p} \quad (4.9)$$

Sendo assim, analisando a Figura 4.3, a Equação 4.9 também pode ser escrita da seguinte maneira:

$$g = \frac{(V_{ps} + V_{wg})}{(V_{ps} + V_{wg}) + (V_{wc} + V_{pc})} \quad (4.10)$$

Com base nas proporções volumétricas, na estequiometria das reações químicas de hidratação do cimento, deduz-se adiante a expressão que associa a relação gel/espço (g) com o grau de hidratação do cimento (α) e com a relação água/cimento (w/c).

a) Determinação do Volume de Poros Capilares Vazios (V_{pc})

De acordo com Neville e Brooks (2013), em um cimento totalmente hidratado ($\alpha = 1$), o volume de poros capilares (V_{pc}) representa aproximadamente 18,5% do volume original de cimento anidro (V_c). Portanto, para uma mistura com grau de hidratação do cimento variando de $0 \leq \alpha \leq 1$, tem-se:

$$V_{pc} = 0,185 * c_v * \alpha \quad (4.11)$$

Adotando-se massa específica do cimento anidro sem adições igual a 3,15 g/cm³, obtém-se $c_v = c / 3,15$. Onde c representa a massa de cimento anidro. Desta maneira:

$$V_{pc} = 0,185 * \frac{c}{3,15} * \alpha$$

$$V_{pc} = 0,0587 * c * \alpha \quad (4.12)$$

Como condições de contorno para a determinação do volume de poros capilares vazios (V_{pc}) em função do grau de hidratação (α), admitiu-se que V_{pc} é diretamente proporcional e varia linearmente em relação a α .

b) Determinação do Volume dos Produtos Sólidos de Hidratação (V_{ps})

O volume dos produtos sólidos de hidratação (V_{ps}) pode ser determinado pela soma dos volumes apresentados na Figura 4.3, ou seja:

$$w_v + c_v = V_{pc} + V_{wc} + V_{wg} + V_{ps} + V_{cn}$$

$$V_{ps} = w_v + c_v - V_{pc} - V_{wc} - V_{wg} - V_{cn} \quad (4.13)$$

Sabendo que o volume inicial de água da mistura (w_v), durante o processo de hidratação do cimento, compreende a soma dos volumes de água capilar (V_{wc}), água de gel (V_{wg}) e água combinada ($V_{\text{água combinada}}$), está última utilizada nas reações químicas de hidratação do cimento, tem-se:

$$w_v = V_{wc} + V_{\text{água combinada}} + V_{wg}$$

$$V_{wc} = w_v - V_{\text{água combinada}} - V_{wg} \quad (4.14)$$

Sabe-se também que:

$$c_v = V_{cn} + V_{\text{cimento hidratado}}$$

$$V_{cn} = c_v - V_{\text{cimento hidratado}} \quad (4.15)$$

Logo, substituindo as Equações 4.14 e 4.15 na Equação 4.13, tem-se:

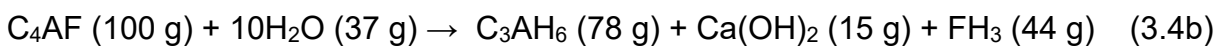
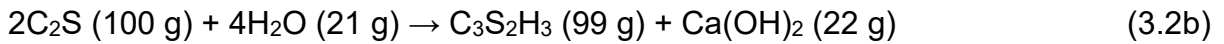
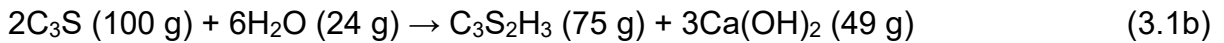
$$V_{ps} = w_v + c_v - V_{pc} - (w_v - V_{\text{água combinada}} - V_{wg}) - V_{wg} - (c_v - V_{\text{cimento hidratado}})$$

$$V_{ps} = V_{\text{cimento hidratado}} + V_{\text{água combinada}} - V_{pc} \quad (4.16)$$

Portanto, demonstra-se que o volume dos produtos sólidos de hidratação (V_{ps}) pode ser determinado pela soma dos volumes de cimento hidratado e da água combinada, menos o volume dos poros capilares vazios (V_{pc}).

Ainda, para a determinação do volume de água combinada ($V_{\text{água combinada}}$) é necessário conhecer os principais compostos químicos do cimento Portland, suas proporções em relação à massa de cimento anidro e as reações químicas de hidratação desses compostos.

As proporções dos principais compostos foram determinadas por Bogue (1929) e estão apresentadas na Tabela 3.3 do subitem 3.1 “*Composição química do cimento Portland anidro e sua hidratação*” deste trabalho. As reações de hidratação dos principais compostos do cimento podem ser escritas conforme as seguintes equações estequiométricas aproximadas e simplificadas, para os compostos C_3S , C_2S , C_4AF e C_3A , respectivamente:



Portanto, por meio da análise das equações estequiométricas apresentadas anteriormente, massa atômica dos elementos e pela lei de conservação de massa de Lavoisier, a água quimicamente combinada corresponde (em % de massa de cimento hidratado) a: 24% de C_3S , 21% de C_2S , 40% de C_3A e 37% de C_4AF .

Ainda, através dos teores dos compostos (apresentados na Tabela 3.3), das equações estequiométricas (que indicam a porcentagem de água em relação à massa de cimento anidro) e da massa específica da água (igual a $1,00 \text{ g/cm}^3$), torna-se possível calcular o volume de água combinada ($V_{\text{água combinada}}$) em função do grau de hidratação do cimento (α) e da massa de cimento (c), conforme detalhado adiante:

$$V_{\text{água combinada}} = \left(\%C_3S * c * \alpha * \frac{24}{100} \right) + \left(\%C_2S * c * \alpha * \frac{21}{100} \right) + \left(\%C_3A * c * \alpha * \frac{37}{100} \right) + \left(\%C_4AF * c * \alpha * \frac{40}{100} \right)$$

$$V_{\text{água combinada}} = (0,444 * c * \alpha * 0,240) + (0,306 * c * \alpha * 0,210) + (0,061 * c * \alpha * 0,370) + (0,104 * c * \alpha * 0,400)$$

$$V_{\text{água combinada}} = 0,235 * c * \alpha \quad (4.17)$$

Larrard (1999)⁸⁹ considera que, em vez dos 23,5% calculados (Equação 4.17), o volume de água combinada é de 24%. Já Mandal, Anand e Agarwala (2023)⁹⁰ e Neville (2016), consideram que é preferível admitir que o volume de água combinada quimicamente ($V_{\text{água combinada}}$) seja igual a 23% da massa de cimento anidro, que corresponde ao volume de água não evaporável, uma vez que as reações químicas de hidratação do cimento são complexas, intrincadas e envolvem equações estequiométricas ainda não totalmente conhecidas.

Neste contexto, sem prejuízo algum ao que se deseja demonstrar, o volume de água combinada adotado foi de 23% da massa de cimento anidro, ou seja:

$$V_{\text{água combinada}} = 0,230 * c * \alpha \quad (4.18)$$

Ainda, no que se refere ao volume de cimento hidratado, este corresponde a:

$$V_{\text{cimento hidratado}} = \frac{1}{3,15} * c * \alpha \quad (4.19)$$

Sendo assim, inserindo as Equações 4.12, 4.18 e 4.19 na Equação 4.16, obtém-se o volume dos produtos sólidos de hidratação (V_{ps}):

$$V_{ps} = \left(\frac{1}{3,15} * c * \alpha \right) + (0,230 * c * \alpha) - (0,0587 * c * \alpha)$$

$$V_{ps} = 0,489 * c * \alpha \quad (4.20)$$

⁸⁹ LARRARD, François de. **Concrete Mixture Proportioning**: a scientific approach. London: E & Fn Spon, 1999.

⁹⁰ MANDAL, Sasankasekhar; ANAND, Vishwajit; AGARWALA, Sushil Kumar. **Concrete Technology**: theory and practice. New Delhi: Aicte, 2023. 253 p. Revisado por M. L. Waikar.

c) Determinação do Volume de Água de Gel (V_{wg})

Para obter o volume de água de gel (V_{wg}), considera-se o fato de que ela corresponde 28% do volume de gel de cimento (NEVILLE; BROOKS, 2013), ou seja:

$$\begin{aligned}
 V_{wg} &= 0,28 * (V_{wg} + V_{ps}) \\
 V_{wg} &= 0,28 * V_{wg} + 0,28 * (0,489 * c * \alpha) \\
 0,72 * V_{wg} &= 0,137 * c * \alpha \\
 V_{wg} &= 0,189 * c * \alpha
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

d) Determinação do Volume de Água Capilar (V_{wc})

O volume de água capilar (V_{wc}) pode ser determinado de 2 maneiras distintas a saber: por meio da representação esquemática das proporções de volumes ou por meio das proporções de água utilizada na mistura.

No primeiro caso, com base na Figura 4.3 e nos volumes já calculados, tem-se:

$$\begin{aligned}
 w_v + c_v &= V_{pc} + V_{wc} + V_{wg} + V_{ps} + V_{cn} \\
 V_{wc} &= w_v + c_v - V_{pc} - V_{wg} - V_{ps} - V_{cn} \\
 V_{wc} &= w_v + c_v - (0,0587 * c * \alpha) - (0,189 * c * \alpha) - (0,489 * c * \alpha) - (c_v - V_{\text{cimento hidratado}}) \\
 V_{wc} &= w_v + c_v - (0,0587 * c * \alpha) - (0,189 * c * \alpha) - (0,489 * c * \alpha) - (c_v - V_{\text{cimento hidratado}}) \\
 V_{wc} &= w_v + c_v - (0,737 * c * \alpha) - \left[c_v - \left(\frac{1}{3,15} * c * \alpha \right) \right] \\
 V_{wc} &= w_v + c_v - (0,737 * c * \alpha) - c_v + (0,317 * c * \alpha) \\
 V_{wc} &= w_v - 0,420 * c * \alpha
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

No segundo caso, de maneira mais simples, por meio das proporções de água utilizada na mistura, obtém-se a mesma Equação 4.22.

$$V_{wc} = w_v - V_{\text{água combinada}} - V_{wg}$$

$$V_{wc} = w_v - (0,230 * c * \alpha) - (0,189 * c * \alpha)$$

$$V_{wc} = w_v - 0,420 * c * \alpha$$

e) Verificação das equações deduzidas

De maneira a verificar a consistência dos resultados, pode-se, a partir da Figura 4.3 estabelecer a seguinte igualdade:

$$w_v + c_v = V_{pc} + V_{wc} + V_{wg} + V_{ps} + V_{cn}$$

$$w_v + c_v = (0,0587 * c * \alpha) + (w_v - 0,420 * c * \alpha) + (0,189 * c * \alpha) + (0,489 * c * \alpha) + (c_v - 0,320 * c * \alpha)$$

$$w_v + c_v = w_v + c_v$$

Logo, as equações lineares deduzidas a partir do modelo físico de Powers estão matematicamente coerentes. Portanto, utilizando essas equações, torna-se possível determinar os volumes das fases hidratadas na estrutura interna do concreto, a partir de uma relação w/c pré-definida e para qualquer grau de hidratação.

A Tabela 4.1 apresenta os volumes das fases quando da hidratação de 100 kg de cimento ($c = 100$ kg) e para uma relação w/c = 0,5, em massa. Lembrando que para 100 kg de cimento e 50 kg de água temos um volume de cimento de $c_v = 100$ kg/3,15 kg/litro = 32 litros e um volume de água de $w_v = 50$ litros. Logo, admitindo um teor nulo de ar incorporado, tem-se um volume total inicial de 82 litros.

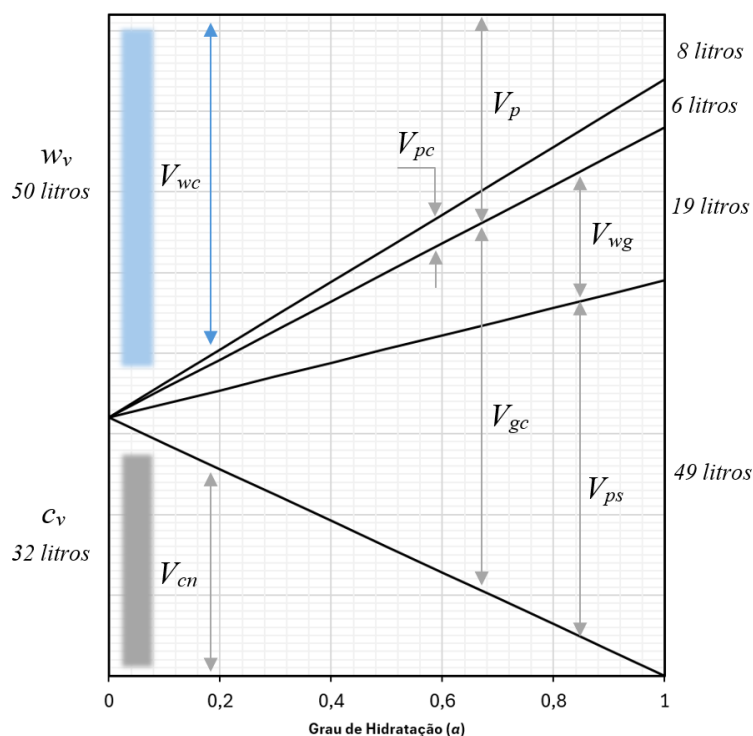
Tabela 4.1 – Volumes para compostos hidratados de cimento segundo o modelo de Powers para uma pasta produzida com 100 kg de cimento e relação w/c = 0,5, em massa.

Fases da pasta presentes na estrutura interna do concreto			Grau de hidratação		
			$\alpha = 0$	$\alpha = 0,67$ (28 dias)	$\alpha = 1$
Capilares	Poros capilares vazios	$V_{pc} = 0,0587 * c * \alpha$	0	4 litros	6 litros
	Água capilar	$V_{wc} = w_v - 0,420 * c * \alpha$	50 litros	22 litros	8 litros
Gel de cimento	Água de gel	$V_{wg} = 0,189 * c * \alpha$	0	13 litros	19 litros
	Produtos sólidos de hidratação	$V_{ps} = 0,489 * c * \alpha$	0	33 litros	49 litros
Cimento não hidratado		$V_{cn} = c_v - 0,320 * c * \alpha$	32 litros	10 litros	0
Volume Total			82 litros	82 litros	82 litros

Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Powers (1958).

Para melhor visualização das fases da pasta de cimento presentes na estrutura interna do concreto, elaborou-se a Figura 4.4 onde se observa a variação dos produtos de hidratação para $0 \leq \alpha \leq 1$, considerando uma pasta produzida com 100 kg de cimento e relação w/c = 0,5, em massa, conforme valores indicados na Tabela 4.1.

Figura 4.4 – Diagrama de hidratação indicando o desenvolvimento dos volumes de compostos da pasta produzida com 100 kg de cimento e relação $w/c = 0,5$, em massa, para $0 \leq \alpha \leq 1$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Vale registrar que os volumes indicados na Figura 4.4 variam conforme as quantidades de cimento e água da pasta. Logo, para cada relação w/c existe um diagrama de hidratação correspondente. Nesse contexto, em material publicado pelo IBRACON no ano de 2017, os Professores Tibério Andrade e Paulo Helene apresentaram os volumes de compostos hidratados para traços de diferentes relações w/c (HELENE; ANDRADE, 2017)⁹¹.

f) Determinação e estudo da relação gel/espço (g)

Desta maneira, considerando $w_v = w/1,00$ e substituindo os volumes obtidos nos subitens anteriores (Equações 4.12, 4.20, 4.21 e 4.22) na Equação 4.10, tem-se:

$$g = \frac{(V_{ps} + V_{wg})}{(V_{ps} + V_{wg}) + (V_{wc} + V_{pc})}$$

⁹¹ HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo C. (ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2017. Cap. 29. p. 970-1005.

$$g = \frac{(0,489 * c * \alpha + 0,189 * c * \alpha)}{(0,489 * c * \alpha + 0,189 * c * \alpha) + (w_v - 0,420 * c * \alpha + 0,0587 * c * \alpha)}$$

$$g = \frac{(0,678 * c * \alpha)}{(0,678 * c * \alpha) + \left(\frac{w}{1,00} - 0,361 * c * \alpha\right)}$$

$$g = \frac{(0,68 * c * \alpha)}{(0,32 * c * \alpha) + w}$$

Logo, fica demonstrado que a relação gel/espço (g) pode ser determinada em função do grau de hidratação do cimento (α) e da relação água/cimento em massa (w/c) da seguinte maneira:

$$g = \frac{0,68 * \alpha}{0,32 * \alpha + w/c} \quad (2.5)$$

Onde:

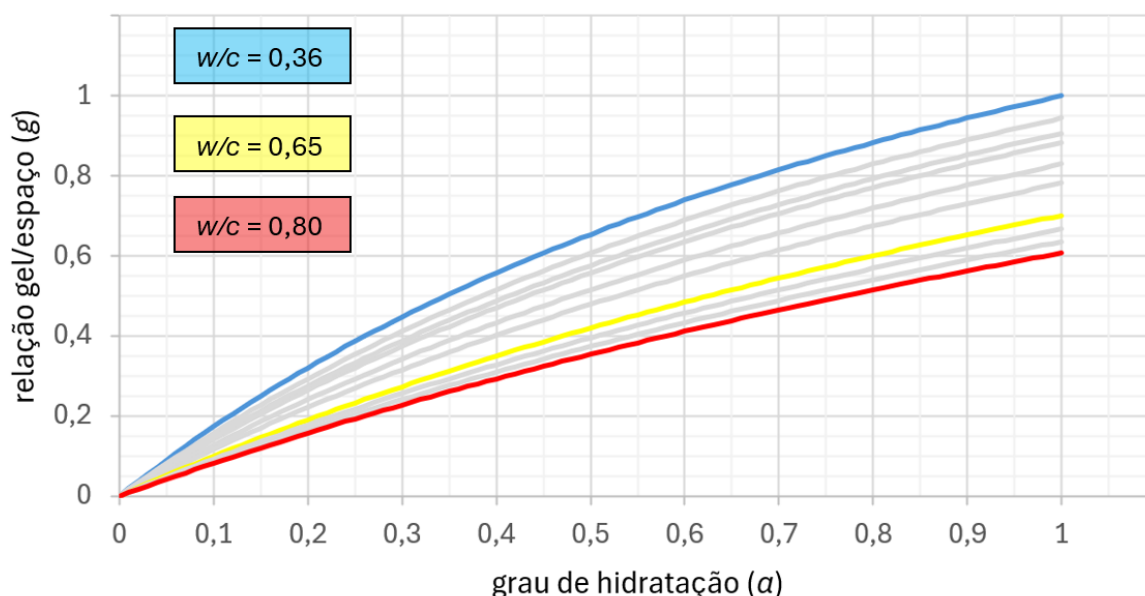
g : relação gel/espço, adimensional;

α : grau de hidratação do cimento, varia de 0 a 1;

w/c : relação água/cimento, em massa.

A Figura 4.5 apresenta graficamente o valor da relação gel/espço (g) em função do grau de hidratação do cimento (α) para diferentes relações água/cimento, estas variando de $0,36 \leq w/c \leq 0,80$, calculado conforme a Equação 2.5.

Figura 4.5 - Gráfico da relação gel/espço em função do grau de hidratação para relações água/cimento variando de $0,36 \leq w/c \leq 0,80$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Substituindo a Equação 2.5 na Equação 2.4, obtém-se a conhecida equação deduzida com base nas considerações do modelo de Powers:

$$f_c = k_5 * \left[\frac{0,68*\alpha}{0,32*\alpha + \frac{w}{c}} \right]^{k_6} \quad (4.23)$$

Onde:

f_c : resistência à compressão;

k_5 : coeficiente que representa a resistência do concreto hidratado.

k_6 : coeficiente adimensional.

α : grau de hidratação do cimento, varia de 0 a 1;

w/c : relação água/cimento, em massa.

Helene (1987) entende que a Equação 4.23 tem um caráter mais didático no sentido de contribuir para o entendimento da estrutura interna do concreto do que propriamente para se obter parâmetros práticos de aplicação direta. Há de se entender também que, como demonstrado nas deduções, a obtenção da Equação 4.23 envolveu simplificações que devem sempre ser consideradas quando de seu emprego.

Conforme já mencionado, o valor da relação gel/espaco (g) também pode ser representado por $g = 1 - p$, onde p representa a porosidade da pasta. Sabe-se que esta última está intimamente relacionada com a resistência à compressão do concreto. Trata-se de uma relação fundamental e inversamente proporcional entre porosidade e resistência dos sólidos.

Com base nesta premissa, a relação gel/espaco pode ser utilizada para estimar a relação água/cimento (w/c) necessária para que os produtos de hidratação (gel de cimento) ocupem todos os espaços disponíveis ($p = 0$), ou seja, $g = 1 - p \rightarrow g = 1 - 0 \rightarrow g = 1$. Logo:

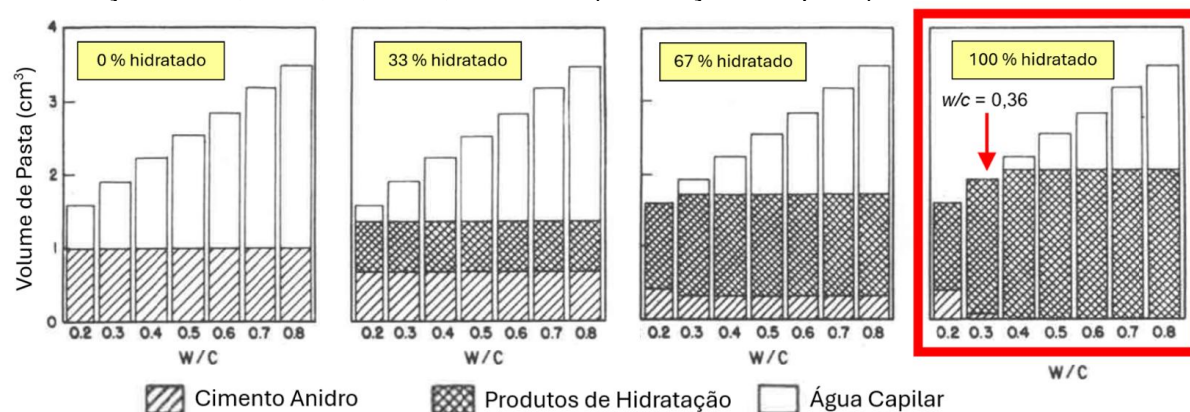
$$g = \frac{(0,68*\alpha)}{(0,32*\alpha) + \frac{w}{c}} \rightarrow 1 = \frac{(0,68*\alpha)}{(0,32*\alpha) + \frac{w}{c}} \rightarrow 0,32 * \alpha + \frac{w}{c} = 0,68 * \alpha \rightarrow \frac{w}{c} = 0,36 * \alpha \rightarrow \frac{w}{c} = 0,36 * 1$$

$$\frac{w}{c} = 0,36$$

Abaixo deste valor nem todo cimento anidro se hidrata. Acima deste valor há mais água no sistema do que a necessária para a hidratação do cimento anidro. Registra-se que o valor de $w/c = 0,36$, obtido por meio das premissas supracitadas,

está coerente com os resultados obtidos por Powers (1958), como pode ser observado abaixo à direita na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Gráficos do volume da pasta (cm^3) vs. relação água/cimento para graus de hidratação: $\alpha = 0$, $\alpha = 0,33$, $\alpha = 0,67$ e $\alpha = 1$ (hidratação completa).



Fonte: Powers (1958), p. 2.

Outra questão a ser analisada, são os valores assumidos pelos coeficientes k_5 e k_6 da Equação 4.23.

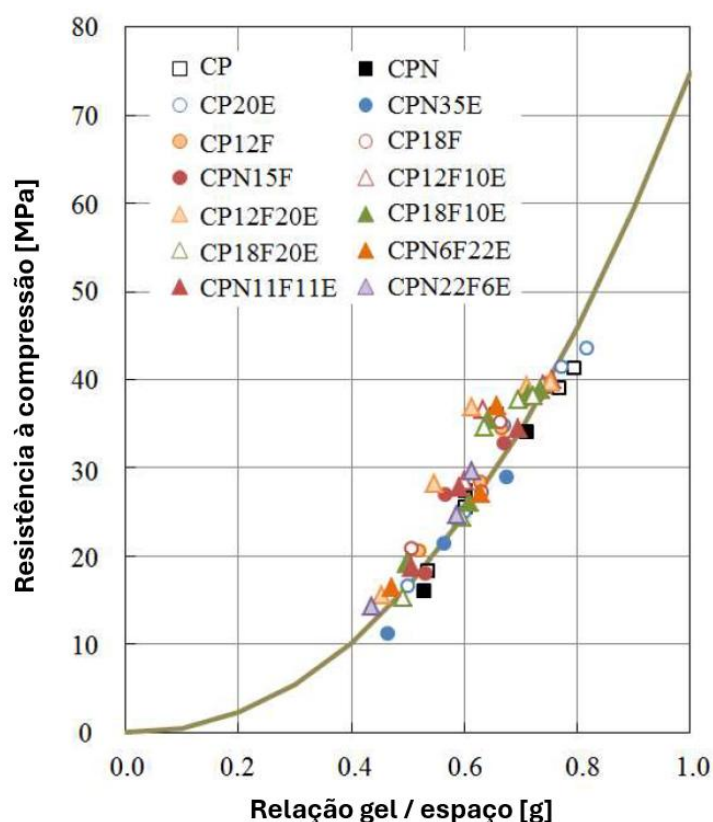
Considerando as premissas do modelo de Powers, a máxima resistência à compressão é atingida quando todo o cimento anidro existente na mistura é hidratado, os produtos de hidratação ocupam todos os espaços disponíveis e não há água capilar quando $\alpha = 1$, ou seja, para $w/c = 0,36$, conforme demonstrado anteriormente. Neste caso: $g = \frac{(0,68*\alpha)}{(0,32*\alpha)+w/c} \rightarrow g = 1$. Sendo assim, o coeficiente k_5 , representa a resistência à compressão potencial do concreto. Já o coeficiente k_6 indica o quão rápido a resistência se desenvolve à medida que o grau de hidratação aumenta, para uma mesma relação w/c .

Powers (1958), admite que os coeficientes k_5 e k_6 são iguais a 234 MPa e 3, respectivamente (vide Figura 4.2). Tango (1990), entende que o coeficiente k_5 assume valores da ordem de 250 MPa, enquanto k_6 varia entre 2,6 e 3. Tutikian e Helene (2022)⁹², recomendam que o valor de k_5 seja da ordem de 120 MPa e k_6 da ordem de 3. Taylor (1997) utiliza $k_6 = 3$ e $90 \text{ MPa} \leq k_5 \leq 130 \text{ MPa}$. Neville (2016) adota exatamente os mesmos valores de Powers.

⁹² TUTIKIAN, Bernardo F.; HELENE, Paulo. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: TUTIKIAN, Bernardo; PACHECO, Fernanda; ISAÍIA, Geraldo; BATTAGIN, Inês (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2022. Cap. 12. p. 485-527.

Irassar, Bonavetti, Menéndez e Carrasco (2015)⁹³ ao estudar, à luz do modelo de Powers, o comportamento de diversos traços de concreto, produzidos com diferentes tipos de cimento compostos argentinos, concluíram que o desenvolvimento da resistência em função do grau de hidratação é dado por: $f_c = 75 * \left[\frac{0,68 * \alpha}{0,32 * \alpha + \frac{w}{c}} \right]^2$, em MPa, ou seja, $k_5 = 75$ MPa e $k_6 = 2$. A Figura 4.7 apresenta os resultados obtidos no referido estudo.

Figura 4.7 – Resistência à compressão (MPa) vs. relação gel/espço.



Fonte: Irassar, Bonavetti, Menéndez e Carrasco (2015). p. 91.

Ao analisar os valores adotados para os coeficientes k_5 e k_6 pelos diversos pesquisadores, nota-se uma grande variação. Tal cenário, muito provavelmente, se explica devido as características do cimento utilizado em cada um dos estudos, por exemplo: classe de resistência, composição química, finura entre outros, além das particularidades de produção, adensamento e condições de cura das amostras ensaiadas.

⁹³ IRASSAR, E. F.; BONAVETTI, V. L.; MENÉNDEZ, G.; CARRASCO, M. F.. Hidratación y propiedades de cemento ternarios con filler calcáreo y escoria. **Revista Alconpat**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 83-95, 30 maio 2015. Alconpat Internacional. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i2.79>.

Conforme demonstrado, a resistência à compressão (f_c) é função de duas variáveis, a primeira é o grau de hidratação do cimento (α), a segunda é a relação água/cimento do traço (w/c). É possível demonstrar qual dessas variáveis exerce maior influência no crescimento da resistência. Para tanto, Helene e Levy (2013)⁹⁴ derivaram parcialmente a função f_c (Equação 4.23) em relação a α e em relação a w/c obtendo:

$$\frac{\partial f_c}{\partial \alpha} = k_5 * k_6 * \left[\frac{0,68*\alpha}{0,32*\alpha + \frac{w}{c}} \right]^{K_6-1} * \left\{ \frac{[(0,32*\alpha + \frac{w}{c}) * 0,68] - [0,68*\alpha * 0,32]}{[0,32*\alpha + \frac{w}{c}]^{K_6-1}} \right\} \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial f_c}{\partial w/c} = k_5 * k_6 * \left[\frac{0,68*\alpha}{0,32*\alpha + \frac{w}{c}} \right]^{K_6-1} * \left\{ \frac{[(0,32*\alpha + \frac{w}{c}) * 0] - [0,68*\alpha * 1]}{[0,32*\alpha + \frac{w}{c}]^{K_6-1}} \right\} \quad (4.25)$$

Dividindo-se as Equações 4.24 e 4.25, tem-se:

$$\frac{\partial f_c / \partial \alpha}{\partial f_c / \partial w/c} = - \frac{w/c}{\alpha} \quad (4.26)$$

Para analisar qual das variáveis terá maior influência no desenvolvimento da resistência à compressão, considera-se o módulo da razão das derivadas parciais, ou seja:

$$\left| \frac{\partial f_c / \partial \alpha}{\partial f_c / \partial w/c} \right| = \left| - \frac{w/c}{\alpha} \right| = \frac{w/c}{\alpha} \quad (4.27)$$

Sendo assim, existem 3 possibilidades:

- a) se $\left| \frac{\partial f_c / \partial \alpha}{\partial f_c / \partial w/c} \right| > 1$, significa dizer que $\partial f_c / \partial \alpha > \partial f_c / \partial w/c$ e, portanto, o grau de hidratação (α) terá maior influência no crescimento da resistência. Como $\left| \frac{\partial f_c / \partial \alpha}{\partial f_c / \partial w/c} \right| = \frac{w/c}{\alpha} > 1$, a influência do grau de hidratação será maior sempre que $w/c > \alpha$.

⁹⁴ HELENE, Paulo; LEVY, Salomon. Curado del hormigón. In: CONPAT, 2013, Cartagena. **Boletín Técnico**. Mérida: Alconpat, 2013. p. 1-12.

- b) se $\left| \frac{\partial f_c / \partial \alpha}{\partial f_c / \partial w/c} \right| < 1$, significa dizer que $\partial f_c / \partial \alpha < \partial f_c / \partial w/c$ e, portanto, a relação água/cimento (w/c) terá maior influência. Como $\left| \frac{\partial f_c / \partial \alpha}{\partial f_c / \partial w/c} \right| = \frac{w/c}{\alpha} < 1$, a influência da relação água/cimento será maior sempre que $w/c < \alpha$.
- c) se $\left| \frac{\partial f_c / \partial \alpha}{\partial f_c / \partial w/c} \right| = 1$, significa dizer que $\partial f_c / \partial \alpha = \partial f_c / \partial w/c$. Portanto, no instante em que $\alpha = w/c$, ambos exercem a mesma influência.

Resumindo, de acordo com o modelo de Powers, enquanto o grau de hidratação (que varia com o tempo de $0 \leq \alpha \leq 1$) for menor que a relação água/cimento do traço (w/c), a influência de α é maior. A partir do instante em que o valor do grau de hidratação passa a ser maior que a relação água/cimento, α deixa de ser preponderante e w/c passa a ter maior influência no desenvolvimento da resistência à compressão.

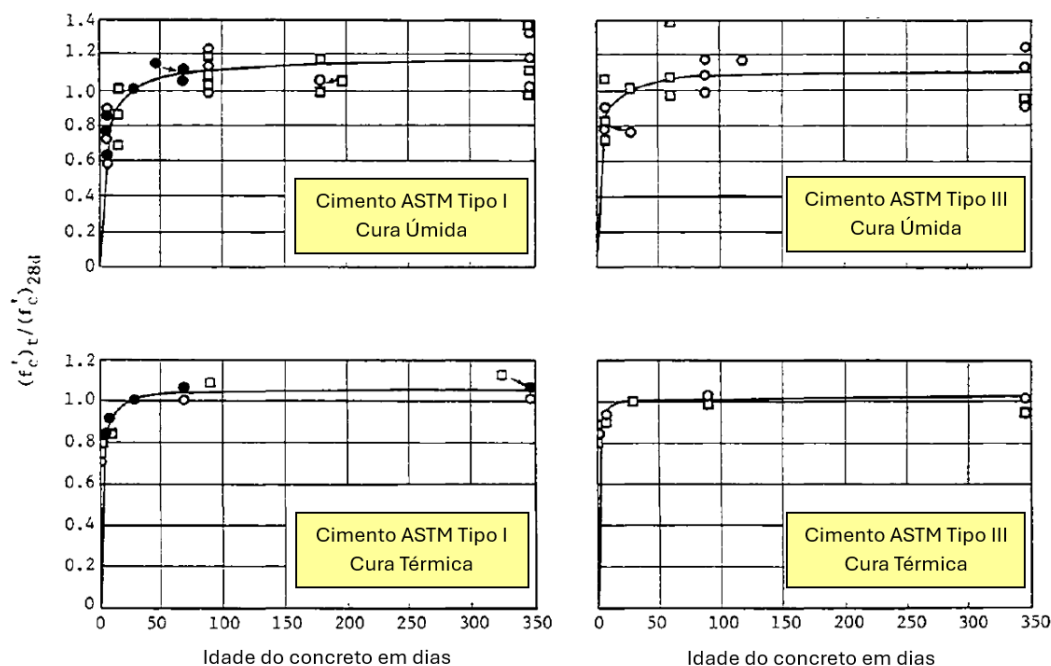
4.4 Modelo ACI Committee 209

Trata-se de um modelo empírico desenvolvido por Dan E. Branson e M. L. Christiason, engenheiros da Universidade de Iowa, nos Estados Unidos. Publicado no ano de 1971, em artigo denominado *“Time dependent concrete properties related to design-strength and elastic properties, creep, and shrinkage”*, o modelo foi concebido considerando diferentes traços de concreto, produzidos com dois tipos de cimento, submetidos à cura úmida e térmica (BRANSON e CHRISTIASON, 1971)⁹⁵.

A Figura 4.8 ilustra as curvas de resistência à compressão do concreto em função do tempo e os resultados experimentais originais do referido estudo.

⁹⁵ BRANSON, D. E.; CHRISTIASON, M. L.. Time Dependent Concrete Properties Related to Design-Strength and Elastic Properties, Creep, and Shrinkage. **Symposium Paper ACI**, Detroit, v. 1971, n. 27, p. 257-278, 1 jan. 1971.

Figura 4.8 – Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto vs. tempo e resultados experimentais.



Fonte: Branson e Christiason (1971), p. 270.

A expressão matemática utilizada pelo ACI – American Concrete Institute para descrever o desenvolvimento da resistência está apresentada no subitem 2.2.1 “Concrete compressive strength versus time” do ACI 209R-92 (Reapproved 2008), Committee 209: “Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures” (ACI, 1992)⁹⁶. Esse modelo permite determinar teoricamente a resistência à compressão do concreto em função do tempo, em qualquer idade da seguinte maneira:

$$f_{c(t)} = \left(\frac{t}{a+bt} \right) * f_{c(28)} \quad (2.17)$$

Onde:

$f_{c(t)}$: resistência à compressão do concreto na idade t , em MPa;

$f_{c(28)}$: resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, em MPa;

t : tempo (dias);

a : coeficiente que pode variar de 0,05 a 9,25, em dias;

b : coeficiente que pode variar de 0,67 a 0,98, adimensional.

⁹⁶ AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 209.2R-92**: Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures. Farmington Hills: Aci, 1992. 43 p.

Nota-se que o modelo de crescimento da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo proposto leva em conta, além dos coeficientes a e b , um parâmetro relativo que é a resistência aos 28 dias de idade ($f_{c(28)}$).

Ainda, de acordo com ACI 209.2R-08, Committee 209: “*Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete*”, em seu Appendix A.1 “*ACI 209R-92 model*”, os valores dos coeficientes a e b são função do tipo de cimento e do tipo de cura empregados, não nesta ordem (ACI, 2008). A norma em questão estabelece como referência alguns valores usuais para esses coeficientes, válidos para concretos de massa específica normal ou leve. Esses valores estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores de referência dos coeficientes a e b . Modelo ACI 209.

Tipo de Cimento	Cura úmida		Cura térmica	
	a	b	a	b
Tipo I	4,0	0,85	1,0	0,95
Tipo III	2,3	0,92	0,7	0,98

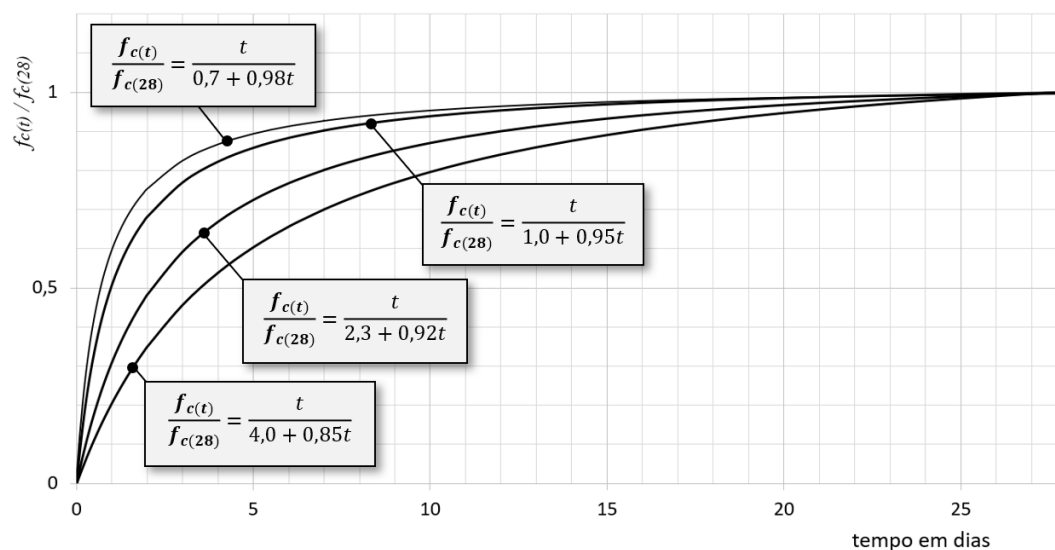
Fonte: ACI (2008).

Convém mencionar que os tipos de cimento apresentados na Tabela 4.2 são classificados pela norma americana ASTM C150/C150M 19a “*Standard specification for Portland cement*” (ASTM, 2019), logo diferem em tipo, resistência e composição, quando comparados aos cimentos nacionais, esses últimos classificados pela ABNT NBR 16697:2018 “*Cimento Portland – Requisitos*” (ABNT, 2018b).

Utilizando a Equação 2.17 e adotando no eixo das ordenadas a razão $f_{c(t)}/f_{c(28)}$ é possível apresentar graficamente as quatro diferentes curvas de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto recomendadas pelo ACI (2008), conforme coeficientes a e b apresentados na Tabela 4.2, tendo como única variável o tempo (t) em dias.

A Figura 4.9 apresenta essas curvas de crescimento relativo da resistência para as primeiras idades (até os 28 dias) e as suas expressões matemáticas correspondentes, que permitem efetuar uma análise visual comparativa entre as curvas propostas.

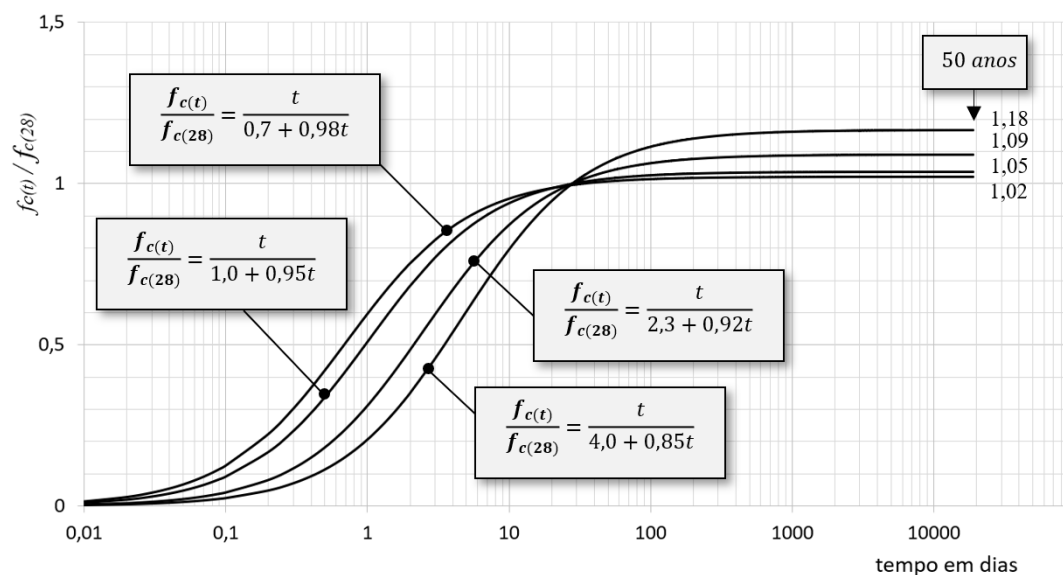
Figura 4.9. Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão até os 28 dias de idade, de acordo com o modelo ACI Committee 209.



Fonte: Elaborada pelo autor, conforme modelo proposto pelo ACI (2008).

Para melhor entendimento do modelo, a Figura 4.10 apresenta as mesmas curvas, com o eixo tempo em escala logarítmica, agora considerando idades avançadas, até os 50 anos.

Figura 4.10. Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão até 50 anos de idade, de acordo com o modelo ACI Committee 209



Fonte: Elaborada pelo autor, com base no modelo proposto pelo ACI (2008).

No gráfico da figura anterior é possível observar que quanto maior o valor do coeficiente b , menor é o valor do coeficiente a , mais rápido cresce a resistência do concreto nas primeiras idades e menor é o valor da resistência atingida em idades avançadas, em relação a resistência aos 28 dias.

Como o eixo das ordenadas representa a razão $f_{c(t)}/f_{c(28)}$, nota-se a existência de um ponto comum dentre todas as curvas que corresponde as coordenadas cartesianas ($t = 28$ dias; $f_{c(t)}/f_{c(28)} = 1$). Desta forma, é razoável esperar que exista uma correlação entre os coeficientes a e b .

Para obter esta correlação, basta substituir $t = 28$ dias na Equação 2.17, uma vez que o modelo proposto é função da resistência nesta idade ($f_{c(28)}$). Sendo assim:

$$f_{c(28)} = \left(\frac{28}{a + b28} \right) * f_{c(28)} \rightarrow \frac{f_{c(28)}}{f_{c(28)}} = \left(\frac{28}{a + b28} \right) \rightarrow 1 = \left(\frac{28}{a + b28} \right)$$

$$a = 28 * (1 - b) \quad (4.28)$$

Caso a correlação supracitada não seja respeitada a razão $f_{c(t)}/f_{c(28)}$ aos 28 dias de idade ($t = 28$) seria diferente de 1(um), resultando em uma incoerência matemática, ou seja a razão $f_{c(28)}/f_{c(28)} \neq 1$. Desta forma, é fundamental entender que os coeficientes a e b propostos pelo ACI Committee 209 (ACI, 2008) e apresentados no denominador da Equação 2.17 são interdependentes, inversamente proporcionais e estão linearmente correlacionados, respeitando a Equação 4.28.

Portanto, o modelo não permite que se atribuam valores aleatórios para os referidos coeficientes, mesmo que ambos os valores se encontrem dentro das faixas estabelecidas ($0,05 \leq a \leq 9,25$ e $0,67 \leq b \leq 0,98$). Faz-se necessário respeitar a correlação de interdependência dada por: $a = 28 * (1 - b)$.

Evidentemente, do ponto de vista da engenharia, aproximações são admitidas e normalmente adotadas em modelos empíricos como este. Nota-se que os próprios valores dos coeficientes a e b recomendados pelo ACI Committee 209 (ACI, 2008) e apresentados na Tabela 4.2 deste trabalho adotam aproximações.

Como existe uma correlação entre os coeficientes a e b , convém registrar que a Equação 2.17 também pode ser escrita em função de apenas um desses coeficientes:

$$f_{c(t)} = \left[\frac{t}{a(1 - t/28) + t} \right] * f_{c(28)} \quad \text{ou} \quad f_{c(t)} = \left[\frac{t}{b(t - 28) + 28} \right] * f_{c(28)}$$

Com base na Equação 2.17, também é possível determinar teoricamente, através da utilização das propriedades matemáticas dos limites, a resistência última do concreto ($f_{c(\infty)}$), também chamada de resistência em idades avançadas, ou seja,

em um tempo muito longo, tendo como referência à resistência aos 28 dias de idade ($f_{c(28)}$).

$$f_{c(\infty)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{t}{a + bt} \right) * f_{c(28)} \rightarrow f_{c(\infty)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{t/t}{a/t + bt/t} \right) * f_{c(28)} \rightarrow f_{c(\infty)} = \frac{1}{0 + 1b} * f_{c(28)}$$

$$f_{c(\infty)} = \frac{1}{b} * f_{c(28)} \quad (4.29)$$

Ou seja, de acordo com o modelo, a resistência última do concreto ($f_{c(\infty)}$) não depende do coeficiente a . Além disso, observa-se que quanto menor o valor do coeficiente b , maior é a resistência teórica final do concreto, em relação a sua resistência aos 28 dias de idade. Isso pode ser observado graficamente na Figura 4.10.

Observa-se também a partir da Equação 4.29, que o coeficiente b representa a razão entre a resistência aos 28 dias de idade ($f_{c(28)}$) e a resistência última ($f_{c(\infty)}$). Ou seja:

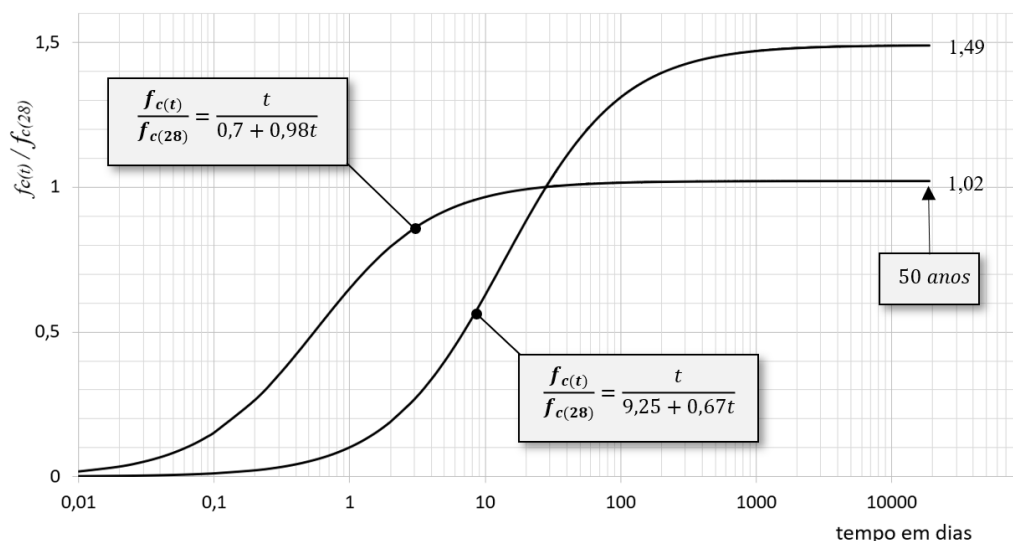
$$b = \frac{f_{c(28)}}{f_{c(\infty)}} \quad (4.30)$$

Tal fato, explica o limite máximo recomendado pelo modelo para o coeficiente b (igual a 0,98), pois b não deve ser ≥ 1 , em hipótese alguma, pois a resistência do concreto sempre aumenta com o tempo. Nota-se também que o valor do coeficiente b indica a porcentagem da resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade em relação a resistência última ($f_{c(28)} = b * f_{c(\infty)}$).

Por meio da análise da Equação 4.29 e considerando os limites estabelecidos pelo ACI Committee 209 (ACI, 2008) para o coeficiente b ($0,67 \leq b \leq 0,98$), observa-se que, de acordo com esse modelo teórico, a resistência última do concreto pode assumir valores variando de 2% a 49% superiores à sua resistência aos 28 dias ($f_{c(\infty)} = 1,02 * f_{c(28)}$ para $b = 0,98$ e $f_{c(\infty)} = 1,49 * f_{c(28)}$ para $b = 0,67$, respectivamente).

A Figura 4.11 apresenta graficamente, em uma escala logarítmica no eixo das abscissas, o crescimento relativo da resistência à compressão do concreto considerando a envoltória de valores ($0,67 \leq b \leq 0,98$), das idades iniciais ($t \approx 0 \rightarrow f_{c(0)} = 0$ MPa) até idades avançadas (neste caso, $t = 18.250$ dias = 50 anos $\rightarrow f_{c(\infty)}$) variando entre $1,02 * f_{c(28)} \leq f_{c(\infty)} \leq 1,49 * f_{c(28)}$, a depender dos coeficientes a e b adotados.

Figura 4.11 - Envolvória das curvas de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto, de acordo com o modelo ACI Committee 209.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base no modelo proposto pelo ACI (2008).

Mediante análise do gráfico da Figura 4.11 é possível observar que:

- ✓ para a equação $f_{c(t)} = [t / (0,7 + 0,98t)] * f_{c(28)}$ a resistência à compressão a partir dos 100 dias de idade ($t \geq 100$ dias) é praticamente constante e 2% superior à resistência aos 28 dias ($f_{c(\infty)} = 1,02 * f_{c(28)}$);
- ✓ para a equação $f_{c(t)} = [t / (9,25 + 0,67t)] * f_{c(28)}$ a resistência à compressão após 11 anos de idade ($t \geq 4000$ dias) é praticamente constante e 49% superior à resistência aos 28 dias ($f_{c(\infty)} = 1,49 * f_{c(28)}$);
- ✓ quanto maior é a resistência última atingida em relação a resistência os 28 dias ($f_{c(\infty)} / f_{c(28)}$), menor é a resistência à compressão relativa nas primeiras idades. Por exemplo, para uma resistência última 49% superior a resistência aos 28 dias ($f_{c(\infty)} = 1,49 * f_{c(28)}$) a resistência com 1 dia de idade representa 10% da resistência aos 28 dias ($f_{c(1)} = 0,1 * f_{c(28)}$), enquanto, para uma resistência última apenas 2% superior a resistência aos 28 dias ($f_{c(\infty)} = 1,02 * f_{c(28)}$) a resistência após 1 dia de idade (24 horas) representa 65% da resistência aos 28 dias ($f_{c(1)} = 0,65 * f_{c(28)}$).

Ainda, por meio da síntese das Equações 2.17 e 4.29, obtém-se uma terceira equação, que também está mencionada no ACI 209R-92 (ACI, 1992), na qual é possível encontrar a resistência à compressão do concreto em uma determinada idade, tendo como referência a resistência última ($f_{c(\infty)}$):

$$f_{c(t)} = \left(\frac{t}{a + bt} \right) * f_{c(28)} \rightarrow f_{c(t)} = \left(\frac{t}{a + bt} \right) * b * f_{c(\infty)} \rightarrow f_{c(t)} = \left(\frac{bt/b}{a/b + bt/b} \right) * f_{c(\infty)}$$

$$f_{c(t)} = \left(\frac{t}{a/b + t} \right) * f_{c(\infty)} \quad (4.31)$$

No caso da utilização da Equação 4.31, deve-se empregar a razão entre os coeficientes a e b . A Tabela 4.3 apresenta os valores para esta razão recomendados pelo ACI (1992) de acordo com o tipo de cimento e cura utilizados. Evidentemente, esses valores foram obtidos a partir dos coeficientes a e b apresentados anteriormente na Tabela 4.2.

Tabela 4.3 – Valores de referência para razão a/b . Modelo ACI 209.

Tipo de Cimento	Cura úmida	Cura térmica
	a/b	a/b
Tipo I	4,71	1,05
Tipo III	2,50	0,71

Fonte: Table 2.2.1 do ACI 209R-92 (Reapproved), Committee 209: “Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures”. ACI (1992).

Observa-se também que, de acordo com o modelo em estudo, a razão a/b representa a idade, em dias, que o concreto atingirá a metade de sua resistência última ($f_{c(\infty)}$). Para visualizar esta constatação basta substituir $t = a/b$ na Equação 4.31, como detalhado adiante:

$$f_{c(a/b)} = \left(\frac{a/b}{a/b + a/b} \right) * f_{c(\infty)}$$

$$f_{c(a/b)} = \frac{1}{2} * f_{c(\infty)} \quad (4.32)$$

Ainda, para se chegar a mesma conclusão apresentada anteriormente, também é possível substituir $f_{c(t)} = f_{c(\infty)} / 2$, na Equação 4.31, o que resulta em $t = a/b$. A Equação 4.31 se encontra mencionada no texto da norma ACI 209R-92 (Reapproved 2008) “Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures” em seu subitem 2.2 “Strength and elastic properties” (ACI, 1992).

Continuando, a partir das Equações 2.17 e 4.31 é possível elaborar as Tabelas 4.4 e 4.5 que apresentam os valores percentuais de resistência à compressão teórica obtidos, tendo como base as resistências aos 28 dias ($f_{c(28)}$) e última do concreto ($f_{c(\infty)}$), respectivamente.

Tabela 4.4 – Valores relativos de resistências obtidos a partir da Equação 2.17 proposta pelo ACI Committee 209, tendo como referência a resistência teórica aos $f_{c(28)}$.

Razão entre resistências	Tipo de Cura	Tipo de Cimento	Constantes a, b e razão a/b	Idade do Concreto									
				dias								anos	
				3	7	14	21	28	56	91	1	10	última
$f_{c(t)} / f_{c(28)}$	úmida	I	$a = 4,0; b = 0,85$	0,46	0,70	0,88	0,96	1,00	1,08	1,12	1,16	1,17	1,18
		III	$a = 2,3; b = 0,92$	0,59	0,80	0,92	0,97	1,00	1,04	1,06	1,08	1,09	1,09
	térmica	I	$a = 1,0; b = 0,95$	0,78	0,91	0,98	1,00	1,00	1,03	1,04	1,05	1,05	1,05
		III	$a = 0,70; b = 0,98$	0,82	0,93	0,97	0,99	1,00	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02

Fonte: ACI (1992).

Tabela 4.5 – Valores relativos de resistências obtidos a partir da Equação 4.31 proposta pelo ACI Committee 209, tendo como referência a resistência teórica na idade última $f_{c(\infty)}$.

Razão entre resistências	Tipo de Cura	Tipo de Cimento	Constantes a, b e razão a/b	Idade do Concreto									
				dias								anos	
				3	7	14	21	28	56	91	1	10	última
$f_{c(t)} / f_{c(\infty)}$	úmida	I	$a/b = 4,71$	0,39	0,60	0,75	0,82	0,86	0,92	0,95	0,99	1,00	1,00
		III	$a/b = 2,50$	0,54	0,74	0,85	0,89	0,92	0,96	0,97	0,99	1,00	1,00
	térmica	I	$a/b = 1,05$	0,74	0,87	0,93	0,95	0,96	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00
		III	$a/b = 0,71$	0,81	0,91	0,95	0,97	0,97	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00

Fonte: ACI (1992).

Por fim, vale registrar que o Appendix A “Models” do ACI 209.2R-08 “Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete” (ACI, 2008) também permite a utilização de um outro modelo de crescimento de resistência denominado “GL2000 model”, conforme detalhado adiante:

$$f_{c(t)} = \beta_e^2 * f_{c(28)} \quad (4.33)$$

Onde:

$f_{c(t)}$: resistência à compressão do concreto na idade t , em MPa;

$f_{c(28)}$: resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, em MPa;

β_e : função que representa o crescimento relativo da resistência à compressão, dado por:

$$\beta_e = e^{\left[\frac{s_1}{2} * \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right]} \quad (4.34)$$

t : tempo, em dias;

s_1 : coeficiente que depende do tipo de cimento, conforme Tabela 4.6,

Tabela 4.6 – Valores de referência para o coeficiente s_1 . Modelo GL2000.

Tipos de Cimento	s_1
Tipo I	0,335
Tipo II	0,4
Tipo III	0,13

Fonte: ACI (2008). Tipos de cimento classificados conforme ASTM (2019).

Observa-se a semelhança do modelo supracitado com o modelo europeu proposto pelo *fib* Model Code 2010 (FIB, 2013)⁹⁷, como será apresentado na Equação 4.39, com a particularidade de que, neste caso os valores sugeridos para o coeficiente s_1 estão calibrados para os cimentos americanos tipo I, II e III, classificados de acordo com a norma ASTM (2019).

Por fim, Gardner e Lockman (2001)⁹⁸, Professores da Universidade de Ottawa, em artigo denominado “*Desing Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal-Strength Concrete*” publicado em 2001 no *ACI Materials Journal* recomendam a utilização do seguinte modelo:

$$f_{c(t)} = \left(\frac{t^{3/4}}{a + bt^{3/4}} \right) * f_{c(28)} \quad (4.35)$$

Onde:

$f_{c(t)}$: resistência à compressão do concreto na idade t , em MPa;

$f_{c(28)}$: resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, em MPa;

t : tempo, em dias;

a e b : coeficientes determinados de acordo com o tipo de cimento, sempre respeitando a seguinte correlação de interdependência: $a = 12,2 * (1 - b)$, conforme Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Valores de referência para os coeficientes a e b . Modelo Gardner e Lockman.

Tipos de Cimento	Coeficiente a	Coeficiente b
Tipo I	2,8	0,77
Tipo II	3,4	0,72
Tipo III	1,0	0,92

Fonte: Item “*Strength development with time*” do artigo publicado por Gardner e Lockman (2001). Tipos de cimento classificados conforme ASTM (2019).

4.5 Modelos CEB-FIP Model Code 1990 e *fib* Model Code 2010

O CEB-FIP Model Code 1990 (CEB, 1993) em seu item 2 “*Material Properties*” recomenda a utilização de uma expressão em formato exponencial para representar

⁹⁷ FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **2010**: Fib Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne: FIB, 2013. 402 p.

⁹⁸ GARDNER, N. J.; LOCKMAN, M. J.. Design Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal-Strength Concrete. *Aci Materials Journal*, [S.L.], v. 98, n. 2, p. 159-167, 2001. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/10199>.

o crescimento da resistência à compressão do concreto em função do tempo. Essa expressão leva em consideração um coeficiente s , que varia de acordo com o tipo do cimento utilizado. A expressão recomendada pelo código modelo europeu, é dada por:

$$f_{c(t)} = \beta_{cc}(t) * f_{c(28)} \quad (4.36)$$

Onde:

$f_{c(t)}$: resistência à compressão na idade de t , em MPa;

$f_{c(28)}$: resistência à compressão aos 28 dias, em MPa;

$\beta_{cc}(t)$: função que representa o crescimento relativo da resistência à compressão:

$$\beta_{cc}(t) = e^s \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t/t_1}} \right] \quad (4.37)$$

t_1 : 1 dia;

t : idade do concreto, em dias, que pode ser ajustada em função da temperatura, por meio da utilização da seguinte equação:

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{\left[13,65 - \frac{4000}{273+T(\Delta t_i)} \right]} \quad (4.38)$$

Δt_i : é o número de dias nos quais a temperatura T prevalece;

$T(\Delta t_i)$: é a temperatura média em °C durante o intervalo de tempo Δt_i , válida para uma variação de $0^\circ\text{C} \leq T \leq 80^\circ\text{C}$;

s : coeficiente adimensional que depende do tipo de cimento utilizado, conforme apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Valores de referência para o coeficiente s . Modelo CEB-FIP Model Code 1990.

Tipos de Cimento	Coeficiente s
SL – cimentos de endurecimento lento	0,38
N e R – cimentos de endurecimento normal e rápido, respectivamente	0,25
RS – cimentos de alta resistência e endurecimento rápido	0,20

Fonte: CEB (1993).

Registra-se que os tipos de cimento e suas classificações (SL, N, R e RS) estão detalhados no Appendix d.4.2.1 “*Types and requirements*” do CEB-FIP Model Code 1990 (CEB, 1993).

Ainda, é interessante notar que para uma temperatura constante de 20 °C, ou seja, $T_{(\Delta t_i)} = 20$ °C, não há necessidade de ajuste da idade t , uma vez que, neste caso, a equação do tempo ajustado em função da temperatura pode ser simplificada da seguinte forma:

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{\left[13,65 - \frac{4000}{273+20}\right]} \rightarrow t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{[0]} \rightarrow t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i * 1 \rightarrow t = t$$

O *fib* Model Code 2010 (FIB, 2013) em seu item 5 “*Materials*” recomenda a utilização do mesmo modelo para a determinação da resistência à compressão ao longo do tempo, suprimindo apenas o valor t_1 da Equação 4.37, fato que não implica em alterações, uma vez que $t_1 = 1$ dia. O ajuste do tempo em função da variação da temperatura também é permitido, tal qual indicado na Equação 4.38.

Sendo assim, para o modelo *fib* Model Code 2010, tem-se:

$$f_{c(t)} = \beta_{cc}(t) * f_{c(28)}$$

$$f_{c(t)} = e^{s \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]} * f_{c(28)} \quad (4.39)$$

Onde:

$f_{c(t)}$: resistência à compressão na idade de t , em MPa;

$f_{c(28)}$: resistência à compressão aos 28 dias, em MPa;

$\beta_{cc}(t)$: função que representa o crescimento relativo da resistência à compressão.

t : tempo, em dias;

s : coeficiente adimensional que depende do tipo de cimento e da classe de resistência do concreto, conforme apresentado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Valores de referência para o coeficiente s . Modelo *fib* Model Code 2010.

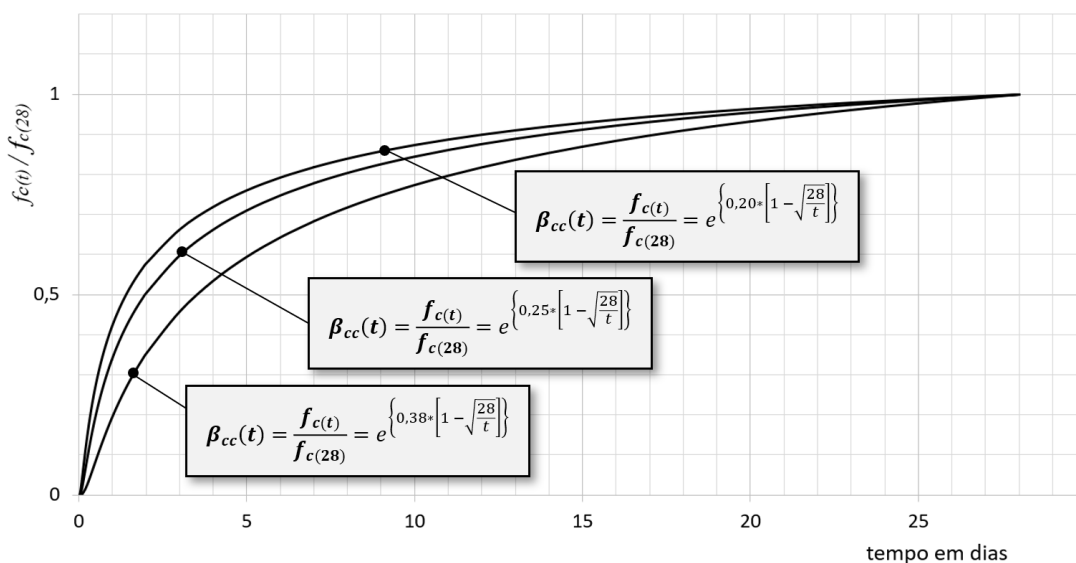
Resistência à compressão do concreto (classe de resistência)	Classe de resistência do cimento	Coeficiente s
≤ 60 MPa	32,5 N	0,38
	32,5 R; 42,5 N	0,25
	42,5 R; 52,5 N; 52,5 R	0,20
> 60 MPa	todas as classes	0,20

Fonte: Subitem 5.1.9.1 “*Development of strength with time*” do *fib* Model Code for Concrete Structures 2010. FIB (2013).

Nota-se que o coeficiente s assume os mesmos valores que os preconizados anteriormente pelo CEB-FIP Model Code 1990: 0,20, 0,25 e 0,38. Porém, o *fib* Model Code 2010 adota diferentes critérios de seleção: tipo de cimento (R ou N, alta resistência inicial ou não, respectivamente), sua classe de resistência (32,5, 42,5 ou 52,5), definidos conforme premissas estabelecidas no item 7 “*Mechanical, physical, chemical and durability requirements*” da norma europeia EN 197-1:2000 “*Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements*” (CEN, 2000)⁹⁹ e a classe de resistência do concreto (≤ 60 MPa ou > 60 MPa).

A Figura 4.12 apresenta graficamente as curvas de desenvolvimento da resistência à compressão do concreto até os 28 dias e seu crescimento relativo nas primeiras idades para os três diferentes valores do coeficiente s recomendados.

Figura 4.12 - Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão até os 28 dias de idade, conforme modelo CEB-FIP Model Code 1990 e *fib* Model Code 2010.



Fonte: Elaborada pelo autor com base no CEB (1993) e no FIB (2013).

Aplicando na Equação 4.39 o conceito de limite com o tempo tendendo ao infinito, obtém-se o comportamento do modelo europeu em um tempo muito longo ($f_{c(\infty)}$):

$$f_{c(\infty)} = \lim_{t \rightarrow \infty} e^{s \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right]} * f_{c(28)} \rightarrow f_{c(\infty)} = e^{s[1-\sqrt{0}]} * f_{c(28)}$$

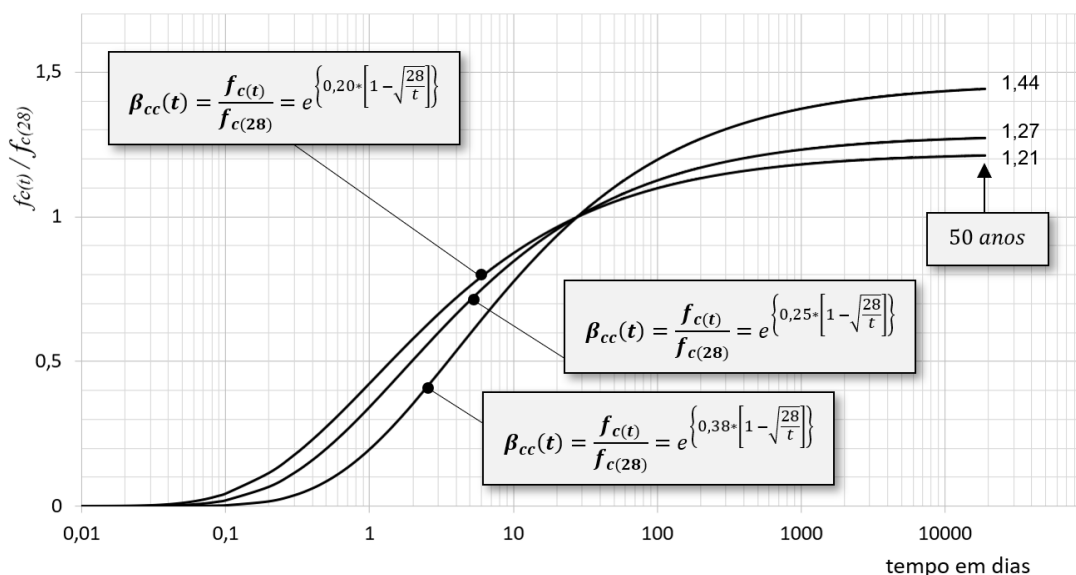
⁹⁹ COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 197-1**: Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels: Cen, 2000. 29 p.

$$f_{c(\infty)} = e^s * f_{c(28)} \quad (4.40)$$

Ou seja, quanto maior o valor do coeficiente s , maior será a resistência relativa final do concreto. Para $s = 0,20$ temos uma resistência final 22% superior à resistência aos 28 dias de idade ($f_{c(\infty)} = 1,22 * f_{c(28)}$). Para $s = 0,38$ temos um crescimento de 46% a partir da resistência aos 28 dias de idade ($f_{c(\infty)} = 1,46 * f_{c(28)}$). Logo, e^s representa matematicamente quantas vezes a resistência última do concreto é superior a resistência aos 28 dias.

Para melhor entendimento, a Figura 4.13 apresenta as resistências desenvolvidas até os 50 anos de idade. Nota-se que nesta idade, para coeficiente de crescimento igual a 0,20 ($s = 0,20$) a resistência do concreto é 21% superior à observada aos 28 dias ($f_{c(50 \text{ anos})} = 1,21 * f_{c(28)}$) e para $s = 0,38$, a resistência do concreto é 44 % superior à verificada aos 28 dias ($f_{c(50 \text{ anos})} = 1,44 * f_{c(28)}$), ou seja, praticamente as mesmas que as resistências últimas mencionadas no parágrafo anterior.

Figura 4.13 - Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão até os 50 anos de idade, conforme modelo CEB-FIP Model Code 1990 e *fib* Model Code 2010.



Fonte: Elaborada pelo autor com base no CEB (1993) e no FIB (2013).

Por fim, considerando o modelo proposto pelo *fib* Model Code 2010, também é possível encontrar a resistência à compressão do concreto em uma determinada idade, tendo como referência a resistência última ($f_{c(\infty)}$). Para tanto, comuta-se as Equações 4.39 e 4.40, resultando em:

$$f_{c(t)} = \frac{1}{e^{s\sqrt{\frac{28}{t}}}} * f_{c(\infty)} \quad (4.41)$$

Onde:

$f_{c(t)}$: resistência à compressão na idade de t , em MPa;

$f_{c(\infty)}$: resistência à compressão última do concreto, em MPa;

t : tempo, em dias;

s : coeficiente adimensional que depende do tipo de cimento utilizado;

e^s : indica quantas vezes a resistência última do concreto é superior a resistência aos 28 dias, adimensional.

É imperativo registrar que o modelo proposto pelo *fib* Model Code 2010, pela primeira vez, considera a influência da classe de resistência do concreto no desenvolvimento das curvas de crescimento, uma vez que o parâmetro s , a partir da introdução deste modelo, não é definido apenas em função das características do cimento, mas também depende da resistência à compressão do concreto, como pode ser observado na primeira coluna da Tabela 4.9.

Observa-se que, independentemente das características do cimento utilizado, para concretos de classe de resistência > 60 MPa, utiliza-se sempre $s = 0,20$. Isso significa dizer que, de acordo com o modelo, concretos de resistências superiores a 60 MPa aos 28 dias, apresentarão menor crescimento relativo final em relação à resistência aos 28 dias. Sendo $s = 0,20$, tem-se em 50 anos: $f_{c(50 \text{ anos})} = 1,21 * f_{c(28)}$. Em contrapartida, nas primeiras idades, a taxa de crescimento desses concretos é mais acelerada, como observado claramente na Figura 4.13.

Tal comportamento de desenvolvimento das curvas de resistência já havia sido constatado por Helene (1987) que, ao estudar cimentos da época, chegou a esta mesma conclusão, inclusive demonstrando matematicamente, com a ajuda do modelo de Powers, os resultados obtidos¹⁰⁰.

¹⁰⁰ Esta demonstração teórica consta no subitem 3.4 “Evolução da resistência à compressão com a idade” da referência: HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para dosagem e controle dos concretos de cimento Portland**. 1987. 278 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

4.6 Modelo *fib* Model Code 2020

O modelo teórico proposto pelo *fib* Model Code for Concrete Structures 2020 (FIB, 2023) para representar o crescimento da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo apresenta alterações quando comparado ao modelo proposto pelo código de norma anterior (FIB, 2013). A expressão recomendada consta no subitem 14.9.1 “*Development of strength with time*” e está apresentada adiante:

$$f_{c(t)} = \beta_{cc}(t) * f_{c(t_{ref})} \rightarrow \frac{f_{c(t)}}{f_{c(t_{ref})}} = e^{\left\{ s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}} \right] * \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}} \right) \right\}} \quad (2.18)$$

Onde:

$\beta_{cc}(t)$: função que representa o crescimento relativo da resistência à compressão com o tempo, adimensional;

$f_{c(t)}$: resistência à compressão na idade t , em MPa;

t_{ref} : idade de controle e referência, em dias;

$f_{c(t_{ref})}$: resistência à compressão na idade t_{ref} , em MPa;

t : idade do concreto, em dias, que pode ser ajustada em função da temperatura.

Para uma temperatura de 20°C, não há necessidade de ajuste. Caso contrário, utiliza-se a mesma equação preconizada pelo CEB-FIP Model Code 1990 e Model Code 2010, ou seja:

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{\left[13,65 - \frac{4000}{273 + T_{(\Delta t_i)}} \right]} \quad (4.38)$$

Δt_i : é o número de dias nos quais a temperatura T prevalece;

$T_{(\Delta t_i)}$: é a temperatura média em °C durante o intervalo de tempo Δt_i .

Recomenda-se: $T_{(\Delta t_i)} \leq 65^\circ\text{C}$ para evitar risco de DEF - *Delayed Etringite Formation*¹⁰¹.

s_c : coeficiente adimensional relacionado ao desenvolvimento da resistência do concreto que pode variar de 0,1 a 0,6, conforme apresentado na Tabela 4.10.

¹⁰¹ Reação deletéria expansiva que ocorre devido a formação de etringita tardia que, de acordo com Taylor *et al.* (2001, *apud* SANCHEZ, 2024, p. 12) se manifesta em concreto já endurecido (após sua pega) quando submetido a elevada temperatura (superior a 65°C) e na presença de umidade. A DEF é uma forma de ISA – *Internal Sulphate Attack*, ou seja, não há necessidade da contribuição de qualquer fonte externa suplementar de sulfato para que a reação se manifeste.

Tabela 4.10 - Valores de referência para o coeficiente s_c . Modelo *fib* Model Code 2020.

Resistência à compressão do Concreto (Classe de resistência)	s_c		
	Classe CS	Classe CN	Classe CR
$f_c \leq 35$ MPa	0,6	0,5	0,3
$35 \text{ MPa} < f_c < 60$ MPa	0,5	0,4	0,2
$f_c \geq 60$ MPa	0,4	0,3	0,1

Fonte: Subitem 14.9.1 “*Development of strength with time*” do *fib* Model Code for Concrete Structures 2020. FIB (2023).

Para determinação das Classes CS, CN e CR, consultar Tabela B1 “*Strength development classes of concrete*” do Eurocode 2:2023 e a norma EN 197-1 “*Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*” (CEN, 2000).

Vale registrar que para uma idade de controle e referência igual a 28 dias, ou seja, $t_{ref} = 28$ dias, a Equação 2.18 assume o seguinte formato:

$$\frac{f_{c(t)}}{f_{c(t_{ref})}} = e^{\left\{s_c \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}}\right] \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}}\right)\right\}} \rightarrow \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = e^{\left\{s_c \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right] \left(\sqrt{\frac{28}{28}}\right)\right\}}$$

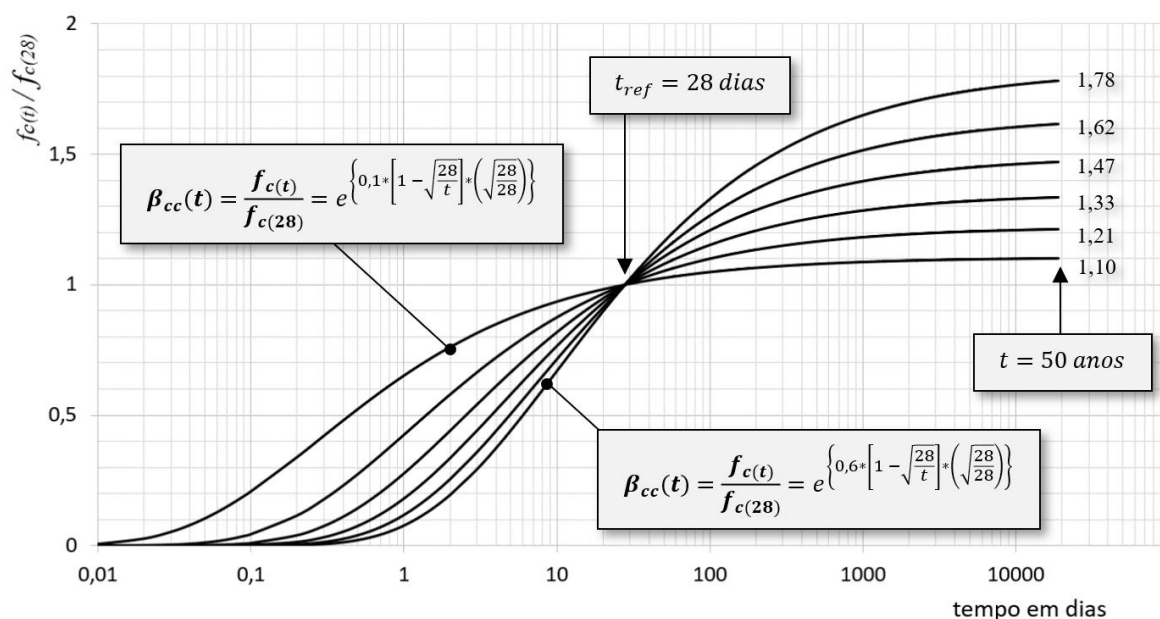
$$\frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = e^{\left\{s_c \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]\right\}} \quad (4.42)$$

Observa-se que a Equação 4.42 é a mesma equação preconizada anteriormente pelo *fib* Model Code 2010 (Equação 4.39), publicado em 2013, com a particularidade de que agora, no atual código modelo 2020, o coeficiente de crescimento da resistência s_c (antes designado pela letra s) assume uma faixa maior de valores. Sendo assim, pode-se registrar as seguintes alterações:

- ✓ O *fib* Model Code 2020 considera maior variabilidade do coeficiente s_c que, agora, pode assumir valores de 0,1 a 0,6. Tal alteração gerou curvas de crescimento de resistência mais realistas e mais adaptadas aos avanços na tecnologia do concreto. Lembrando que na versão anterior deste código de norma este coeficiente era chamado de s e variava apenas entre 0,20 e 0,38;
- ✓ O *fib* Model Code 2020 admite também uma flexibilização da data de controle e referência (t_{ref}). Neste modelo a data pode ser tomada em qualquer idade, usualmente entre 28 e 91 dias, segundo decisão do projetista, sempre levando em conta a sustentabilidade e as condições de execução e uso da estrutura.

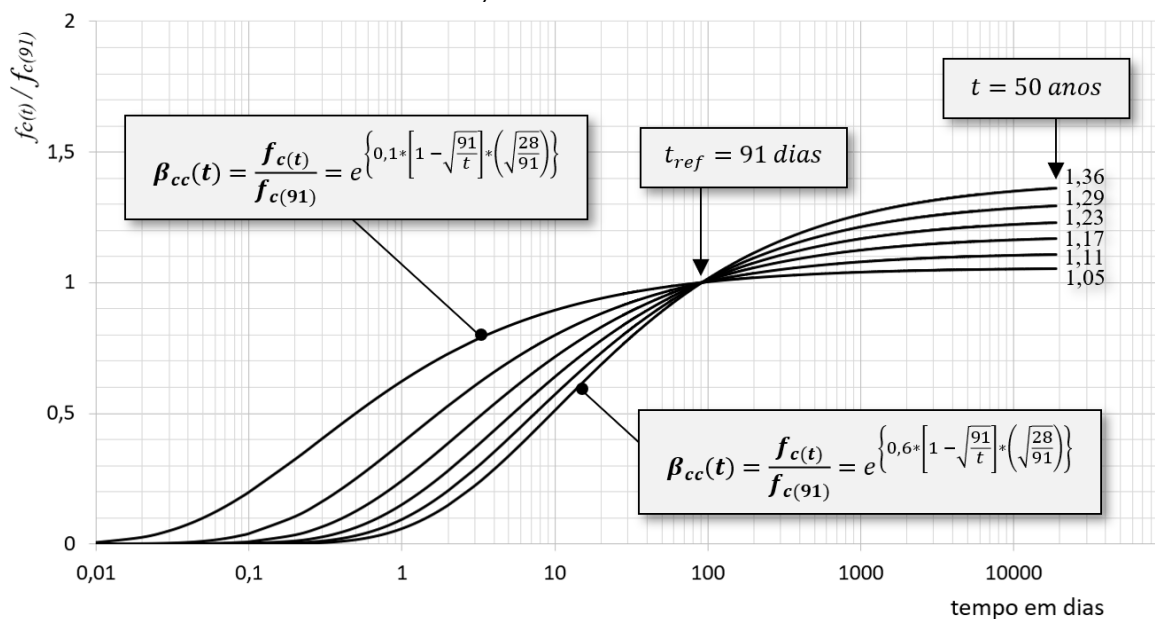
Nas Figuras 4.14 e 4.15 estão apresentadas graficamente as 6 curvas recomendadas pelo *fib* Model Code 2020 para idades de controle e referência $t_{ref} = 28$ dias e $t_{ref} = 91$ dias, respectivamente.

Figura 4.14 - Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão até os 50 anos de idade, considerando $t_{ref} = 28$ dias, conforme modelo *fib* Model Code 2020.



Fonte: Elaborada pelo autor com base no FIB (2023).

Figura 4.15 - Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão até os 50 anos de idade, considerando $t_{ref} = 91$ dias, conforme modelo *fib* Model Code 2020.



Fonte: Elaborada pelo autor com base no FIB (2023).

4.7 Modelo Eurocode 2:2023

O Anexo B (normativo) denominado “*Time dependent behaviour of materials: strength, creep, shrinkage and elastic strain of concrete and relaxation of prestressing steel*” da norma europeia EN 1992-1-1, mais conhecida por Eurocode 2:2023 “*Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*” (CEN, 2023)¹⁰² recomenda a utilização da seguinte equação:

$$f_{c(t)} = \beta_{cc}(t) * f_{c(t_{ref})}$$

$$\beta_{cc}(t) = e^{\left\{ s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}} \right] * \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}} \right) \right\}} \quad (4.43)$$

Onde:

$\beta_{cc}(t)$: função que representa o crescimento relativo da resistência à compressão com o tempo, adimensional;

$f_{c(t)}$: resistência à compressão na idade t , dada em MPa;

t_{ref} : idade de controle e referência, em dias, com $t \leq t_{ref}$;

$f_{c(t_{ref})}$: resistência à compressão na idade t_{ref} , dada em MPa;

t : idade do concreto, em dias, que pode ser ajustada em função da temperatura da seguinte maneira:

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{\left[13,65 - \frac{4000}{273+T(\Delta t_i)} \right]} \quad (4.38)$$

Δt_i : é o número de dias nos quais a temperatura T prevalece;

$T(\Delta t_i)$: é a temperatura média em °C durante o intervalo de tempo Δt_i (sendo que a temperatura pode variar de $0^\circ\text{C} \leq T(\Delta t_i) \leq 80^\circ\text{C}$, de acordo com o *Annex B*). Nota-se que para temperaturas de $T(\Delta t_i) = 20^\circ\text{C}$, não há necessidade de ajuste da idade do concreto (t).

s_c : coeficiente adimensional relacionado ao desenvolvimento da resistência do concreto que pode variar de 0,1 a 0,6, conforme apresentado na Tabela 4.11.

¹⁰² COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 1992-1-1**: Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Brussels, Cen, 2023. 402 p.

Tabela 4.11 - Valores de referência para o coeficiente s_c . Modelo Eurocode 2:2023.

Resistência à compressão do Concreto (Classe de resistência)	s_c		
	Classe CS	Classe CN	Classe CR
$f_c \leq 35$ MPa	0,6	0,5	0,3
$35 \text{ MPa} < f_c < 60$ MPa	0,5	0,4	0,2
$f_c \geq 60$ MPa	0,4	0,3	0,1

Fonte: Tabela B.2 “*Values of the coefficient s_c for different early strength development of concrete and concrete strength*” do Eurocode 2:2023 (CEN, 2023).

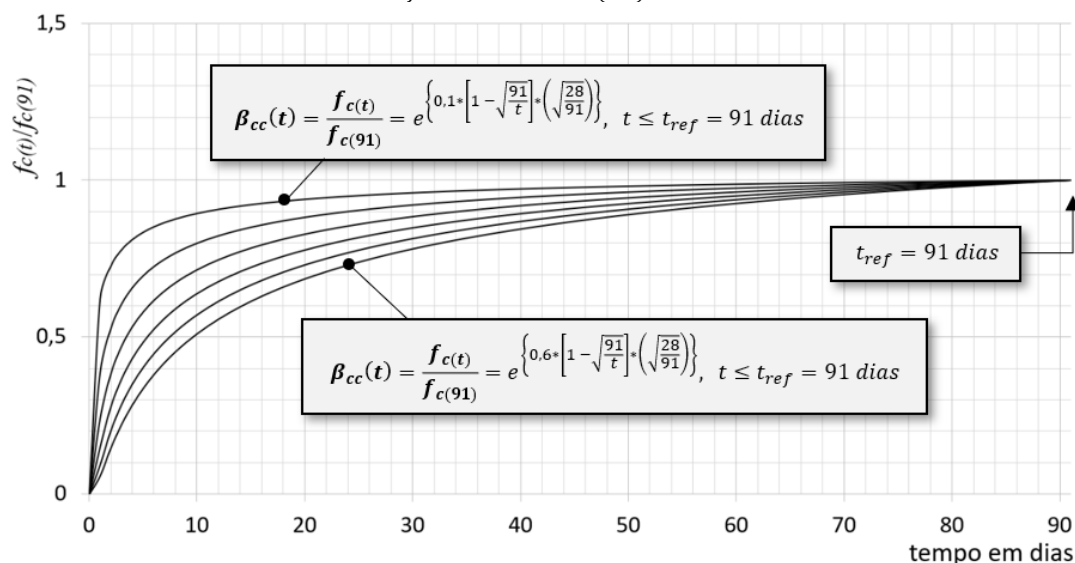
As Classes CS, CN e CR são determinadas em função do tipo e da classe de resistência do cimento. Pode-se admitir, para efeitos de equivalência com os cimentos nacionais: CS (CP III com alto teor de escória ou CP IV), CN (CP I, CP II ou CP III com baixo teor de escória) e CR (CP V-ARI). Novamente, assim como no caso do *fib* Model Code 2020, para determinação das Classes CS, CN e CR, consultar Tabela B1 “*Strength development classes of concrete*” do Eurocode 2:2023 e a norma EN 197-1 “*Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*” (CEN, 2000).

O modelo adotado pelo Eurocode 2:2023 (representado pela Equação 4.43), trata-se do mesmo preconizado pelo *fib* Model Code for Concrete Structures 2020. Portanto, as mesmas observações consideradas quando da análise da Equação 2.18 do subitem anterior continuam validas, exceção feita a uma sutil, mas importante condição de contorno relacionada à idade de controle e referência (t_{ref}).

É imperativo registrar que o modelo, quando aplicado à luz do Eurocode 2:2023, tem validade apenas para $t \leq t_{ref}$, enquanto o *fib* Model Code 2020 não estabelece esta condição. Em outras palavras, significa dizer que, de acordo com o Eurocode 2:2023, as curvas de crescimento são consideradas somente até que a razão $f_{c(t)} / f_{c(t_{ref})}$ seja igual a 1.

Para melhor explicar essa diferença de validade do modelo, a Figura 4.16 apresenta graficamente o desenvolvimento da resistência à compressão, de acordo com o Eurocode 2:2023, considerando idade de controle e referência t_{ref} de 91 dias, adotando uma temperatura $T_{(\Delta ti)}$ de 20°C e coeficientes de crescimento variando de $0,1 \leq s_c \leq 0,6$, conforme detalhado na Tabela 4.11.

Figura 4.16 - Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão, conforme Eurocode 2:2023, considerando $t_{ref} = 91$ dias e $T_{(Δti)} = 20^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Boni e Helene (2024)¹⁰³, p. 5.

4.8 Modelo ABNT NBR 6118:2023

A norma ABNT NBR 6118:2023 “*Projeto de Estruturas de Concreto*” (ABNT, 2023)¹⁰⁴ em seu item 12 “*Resistências*” utiliza a mesma equação proposta pelo CEB-FIP Model Code 1990 e *fib* Model Code 2010, ou seja:

$$f_{c(t)} = \beta_{cc}(t) * f_{c(28)}$$

$$f_{c(t)} = e^{s \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right]} * f_{c(28)} \quad (4.44)$$

Onde:

$f_{c(t)}$: resistência à compressão na idade de t , em MPa;

$f_{c(28)}$: resistência à compressão aos 28 dias, em MPa;

$\beta_{cc}(t)$: função que representa o crescimento relativo da resistência à compressão;

t : tempo em dias, com $t \leq 28$;

¹⁰³ BONI, Ricardo; HELENE, Paulo. Evolução da resistência à compressão do concreto segundo a ABNT NBR 6118:2023; fib Model Code 2020 e Eurocode 2: 2023. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 65., 2024, Maceió. **Anais do 65 CBC**. Maceió: Ibracon, 2024. p. 1-15.

¹⁰⁴ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: Abnt, 2023. 242 p.

s: coeficiente adimensional que depende do tipo de cimento, conforme apresentado na Tabela 4.12. A norma não considera a classe de resistência do cimento e do concreto.

Tabela 4.12 – Valores de referência para o coeficiente s. Modelo ABNT NBR 6118: 2023.

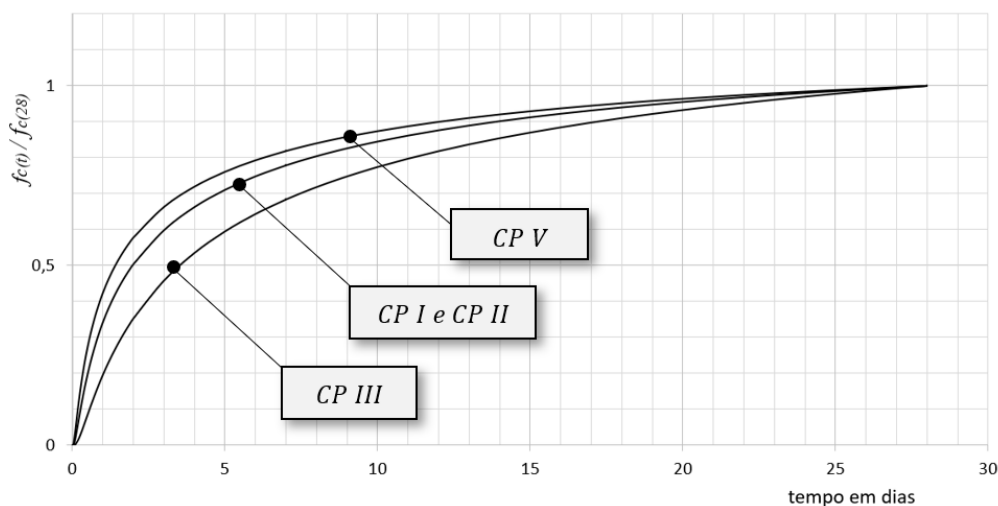
Tipo de cimento	Coeficiente s
CP III e CP IV	0,38
CP I e CP II	0,25
CP V	0,20

Fonte: Subitem 12.3.3 “Resistência de cálculo do concreto” da ABNT (2023).

A referida norma brasileira estabelece em seu subitem 8.2.4 “Resistência à compressão” que na ausência de resultados experimentais, pode-se adotar, em caráter orientativo, para idades inferiores aos 28 dias a Equação 4.44.

A Figura 4.17 apresenta as 3 curvas de crescimento de resistências para concretos produzidos com cimentos CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V, estes classificados conforme a norma brasileira ABNT NBR 16697:2018 “Cimento Portland – Requisitos” (ABNT, 2018b).

Figura 4.17 - Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão, conforme ABNT NBR 6118:2023.



Fonte: Elaborada pelo autor com base na ABNT (2023).

Registra-se que o atual modelo de crescimento de resistência preconizado pela norma brasileira é utilizado desde o ano de 2003, quando da publicação da ABNT NBR 6118:2003 “Projeto de estruturas de concreto – Procedimento” (ABNT, 2003a)¹⁰⁵.

¹⁰⁵ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: Abnt, 2003a. 170 p.

Antes do atual modelo teórico de crescimento, a norma brasileira utilizava o modelo preconizado pela ABNT NBR 7197:1989 “*Projeto de estruturas de concreto protendido*” (ABNT, 1989), atualmente cancelada, conforme apresentado na Equação 2.11:

$$f_{c(t)} = \frac{9 \cdot t \cdot (t+42)}{(9 \cdot t + 40) \cdot (t+61)} * f_{c(\infty)} \quad (2.11)$$

Onde:

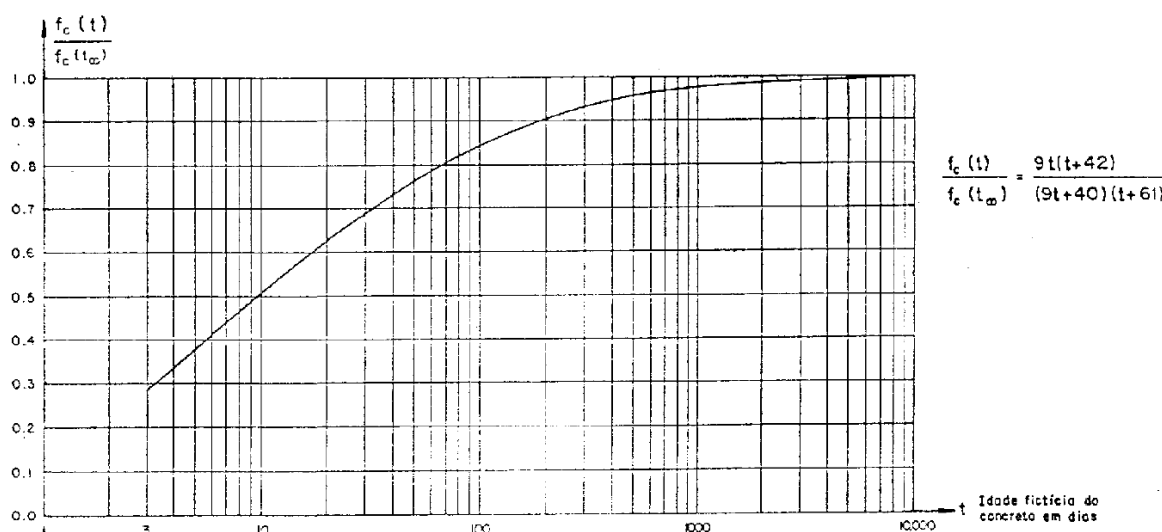
$f_{c(t)}$: resistência à compressão do concreto na idade t , em MPa;

t : idade, em dias;

$f_{c(\infty)}$: resistência à compressão última do concreto, em MPa.

A Figura 4.18, reproduzida da norma ABNT NBR 7197:1989, apresenta graficamente a variação relativa da resistência à compressão do concreto com a idade conforme a Equação 2.11.

Figura 4.18 – Variação relativa da resistência à compressão do concreto com a idade, de acordo com a Equação 2.11.



Fonte: ABNT (1989). p. 15.

Essa mesma expressão também pode ser apresentada em função da resistência aos 28 dias de idade ($f_{c(28)}$). Para tanto, substitui-se $t = 28$ dias na Equação 2.11.

$$f_{c(28)} = \frac{9 \cdot 28 \cdot (28+42)}{(9 \cdot 28 + 40) \cdot (28+61)} * f_{c(\infty)} \rightarrow f_{c(\infty)} = 1,473 * f_{c(28)}$$

Dessa maneira, substitui-se $f_{c(\infty)} = 1,473 * f_{c(28)}$ na Equação 2.11 e obtém-se a Equação 4.45, que estabelece a relação entre $f_{c(t)}/f_{c(28)}$, ou seja, $\beta_{cc}(t)$.

$$\beta_{cc}(t) = \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = \frac{13,259 * t * (t+42)}{(9 * t + 40) * (t+61)} \quad (4.45)$$

Onde:

$\beta_{cc}(t)$: função que representa o crescimento relativo da resistência à compressão;

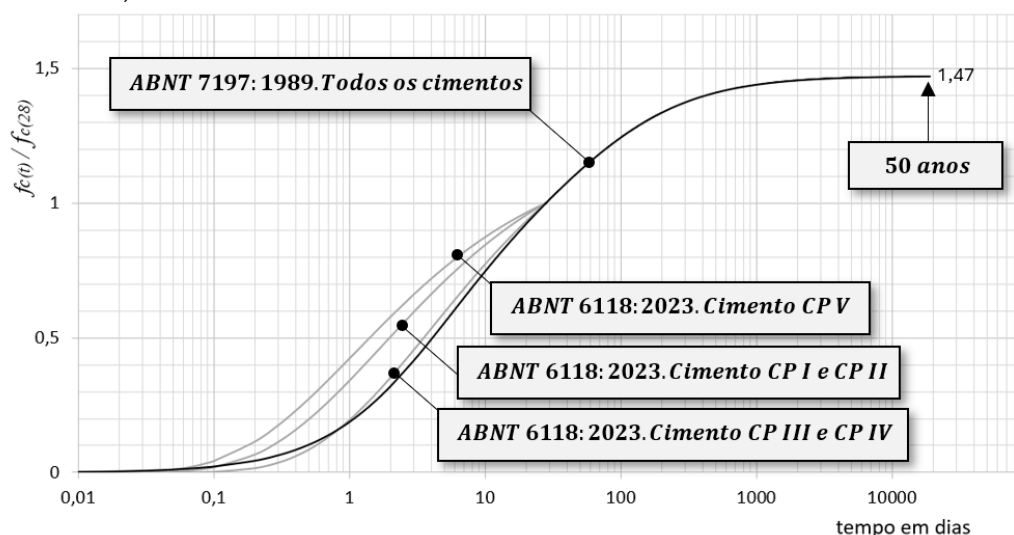
$f_{c(t)}$: resistência à compressão do concreto na idade t , em MPa;

t : idade, em dias;

$f_{c(28)}$: resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade, em MPa.

Por meio das Equações 4.44 e 4.45, torna-se possível efetuar uma análise comparativa entre o comportamento dos modelos das normas brasileiras. Desta maneira, a Figura 4.19 apresenta graficamente o desenvolvimento da resistência do concreto de acordo com os modelos das normas ABNT NBR 7197:1989 e ABNT NBR 6118:2023.

Figura 4.19 - Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto, conforme normas ABNT NBR 7197:1989 e ABNT NBR 6118:2023.



Fonte: Elaborada pelo autor com base na ABNT (1989) e ABNT (2023).

Observa-se que o modelo anterior se aproxima do modelo atual quando da utilização de $s = 0,38$ (concreto produzido com cimento CP III ou CP IV), ou seja, um crescimento menos acelerado nas primeiras idades, com a particularidade de que a curva de crescimento ABNT NBR 7197:1989 (ABNT, 1989) não se limitava à idade de 28 dias, como considerado na atual norma ABNT NBR 6118:2023 (ABNT, 2023).

4.9 O desenvolvimento da resistência à compressão do concreto e sua classificação de acordo com o valor do coeficiente s_c

Considerando o modelo teórico de crescimento da resistência à compressão do concreto utilizado pelo código modelo de norma europeu, aborda-se neste subitem o histórico e as nuances do coeficiente de crescimento s_c por ele adotado, dada sua influência no desenvolvimento das curvas ao longo do tempo.

Até a publicação do *fib* Model Code for Concrete Structures 2020, o coeficiente de crescimento da resistência à compressão era designado pela letra “ s ” e assumia valores variando entre $0,20 \leq s \leq 0,38$, a depender do tipo do cimento utilizado na produção do concreto. Era assim no CEB-FIP Model Code 1990 (CEB, 1993) que adotava para concretos produzidos com cimento de alta resistência de endurecimento rápido (RS), um valor de $s = 0,20$; para concretos com cimento de endurecimento normal e rápido (N e R, respectivamente), $s = 0,25$; e para concretos com cimento de endurecimento lento (SL), $s = 0,38$.

Registra-se que a atual norma brasileira ABNT NBR 6118:2023 ainda adota as premissas do modelo estabelecido no CEB-FIP Model Code 1990 como referência para definição dos limites do coeficiente de crescimento.

Em outubro de 2013, quando da publicação do *fib* Model Code 2010, observou-se uma sutil mudança. Este código modelo, apesar de manter a mesma faixa de valores ($0,20 \leq s \leq 0,38$), passou a adotar além do tipo de cimento, a classe de resistência do concreto para a determinação do coeficiente de crescimento, como detalhado na Tabela 4.9.

Recentemente, no ano de 2023, com a publicação do *fib* Model Code 2020, ampliou-se a faixa de valores que podem ser assumidos pelo coeficiente de crescimento, bem como, refinou-se as classes de resistência do concreto adotadas. Desde então representado por “ s_c ”, o coeficiente de crescimento assume agora valores variando entre $0,1 \leq s_c \leq 0,6$. Esta alteração permitiu maior amplitude do modelo teórico, maior número de curvas de crescimento e, portanto, curvas teóricas mais concordantes com a realidade, quando comparadas com as curvas obtidas anteriormente.

No contexto do *fib* Model Code 2020, de maneira geral, para concretos produzidos com cimento de endurecimento rápido (CR) os valores de s_c variam de 0,1 a 0,3. Para concretos produzidos com cimento de endurecimento normal (CN) os

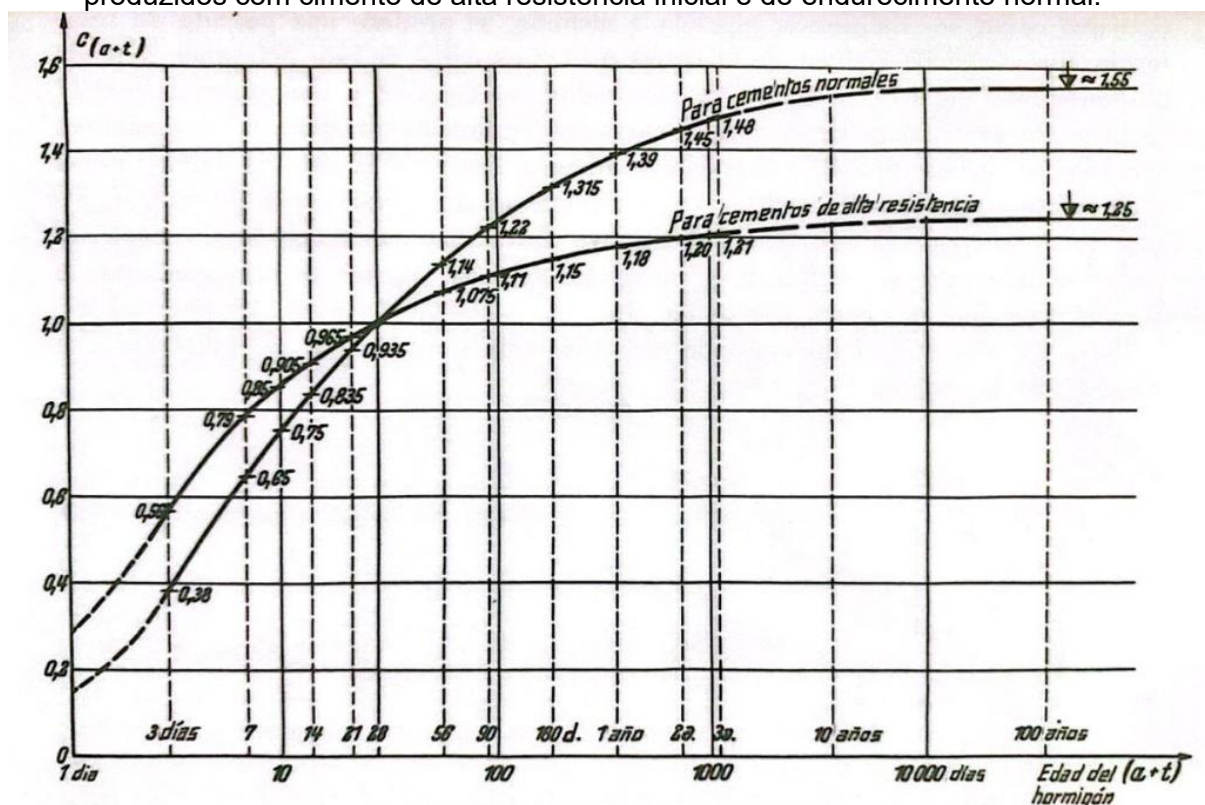
valores de s_c variam de 0,3 a 0,5 e, finalmente, para concretos produzidos com cimento de endurecimento lento (CS) os valores de s_c variam de 0,4 a 0,6.

É importante salientar que não houve alterações conceituais acerca do coeficiente de crescimento, ou seja, continuam válidas as premissas de que, quanto menor for seu valor, maior é o crescimento relativo da resistência nas primeiras idades e menor é o valor final da resistência relativa. Por outro lado, quanto maior o valor deste coeficiente, menor é o crescimento relativo da resistência nas primeiras idades e maior é seu valor final. Este comportamento é facilmente observado na Figura 4.14.

Durante a pesquisa teórica para elaboração desta dissertação, classificações mais antigas referentes ao desenvolvimentos das curvas de crescimento foram encontradas e merecem registro.

Neste contexto, Rüsç (1975) apresentou graficamente duas curvas de crescimento relativo da resistência à compressão para identificar o desenvolvimento da resistência de concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial e para cimento de endurecimento normal, conforme indicado na Figura 4.20.

Figura 4.20 – Curvas de crescimento relativo da resistência para concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial e de endurecimento normal.



Fonte: Rüsç (1975), p. 65.

Nota-se no gráfico Figura 4.20 que após 100 anos de idade, a resistência de concretos produzidos com cimento de endurecimento normal e de alta resistência inicial, representam aproximadamente $f_{c(100 \text{ anos})} = 1,55 * f_{c(28)}$ e $f_{c(100 \text{ anos})} = 1,25 * f_{c(28)}$, respectivamente.

Desta maneira registra-se que é possível encontrar os coeficientes de crescimento s_c associados às curvas indicadas pelo Prof. Hubert Rüsch. Para tanto, deve-se, à luz do *fib* Model Code 2020, efetuar as seguintes operações matemáticas a partir da Equação 2.18.

$$\frac{f_{c(t)}}{f_{c(t_{ref})}} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}}\right] * \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}}\right)\right\}} \rightarrow \frac{f_{c(100 \text{ anos})}}{f_{c(28)}} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{36500}}\right] * \left(\sqrt{\frac{28}{28}}\right)\right\}} \rightarrow \frac{f_{c(100 \text{ anos})}}{f_{c(28)}} = e^{0,972 * s_c}$$

$$s_c = 1,028 * \ln \frac{f_{c(100 \text{ anos})}}{f_{c(28)}}$$

Logo, para o cimento de endurecimento normal, tem-se:

$$s_c = 1,028 * \ln \frac{f_{c(100 \text{ anos})}}{f_{c(28)}} \rightarrow s_c = 1,028 * \ln 1,55 \rightarrow s_c = 0,45$$

Analogamente, para o cimento de alta resistência inicial, tem-se:

$$s_c = 1,028 * \ln \frac{f_{c(100 \text{ anos})}}{f_{c(28)}} \rightarrow s_c = 1,028 * \ln 1,25 \rightarrow s_c = 0,23$$

Nota-se portanto, que a classificação das curvas adotadas por Rüsch (1975), ou seja, aproximadamente 50 anos antes da publicação do *fib* Model Code 2020, apresentam valores de s_c dentro das faixas preconizadas por este último.

Outra classificação encontrada está apresentada na norma europeia EN 206:2013 “Concrete – Specification, performance, production and conformity” (CEN, 2013)¹⁰⁶, em sua Tabela 16 “Strength development of concrete at 20 °C”, que também classifica o desenvolvimento da resistência à compressão em função da resistência relativa do concreto, por meio da razão $f_{c(2)} / f_{c(28)}$, conforme apresentado na Tabela 4.13.

¹⁰⁶ COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 206**: Concrete - Specification, performance, production and conformity. Brussels: Cen, 2013. 102 p.

Tabela 4.13 – Classificação dos concretos de acordo com o desenvolvimento da resistência à compressão a 20 °C.

Desenvolvimento da resistência	Relação de resistência $f_{c(2)}/f_{c(28)}$
rápido	$f_{c(2)}/f_{c(28)} \geq 0,5$
médio	$0,3 \leq f_{c(2)}/f_{c(28)} < 0,5$
lento	$0,15 \leq f_{c(2)}/f_{c(28)} < 0,3$
muito lento	$f_{c(2)}/f_{c(28)} < 0,15$

Fonte: CEN (2013), p. 47.

Novamente, por meio da Equação 2.18 proposta pelo *fib* Model Code 2020, torna-se possível classificar os concretos da Tabela 4.13 em função do coeficiente s_c . Para tanto, basta considerar $t_{ref} = 28$ dias e $t = 2$ dias. Desta maneira, tem-se:

$$\frac{f_{c(t)}}{f_{c(t_{ref})}} = e^{\left\{s_c \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}}\right] \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}}\right)\right\}} \rightarrow \frac{f_{c(2)}}{f_{c(28)}} = e^{\left\{s_c \left[1 - \sqrt{\frac{28}{2}}\right] \left(\sqrt{\frac{28}{28}}\right)\right\}} \rightarrow \frac{f_{c(2)}}{f_{c(28)}} = e^{-2,74*s_c}$$

$$s_c = -0,365 * \ln \frac{f_{c(2)}}{f_{c(28)}}$$

Logo, a classificação dos concretos de acordo com o desenvolvimento da resistência proposto pela norma EN 206:2013 apresentada na Tabela 4.13 também pode ser representada em função do coeficiente s_c , como indicado na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Classificação dos concretos de acordo com o desenvolvimento da resistência à compressão em função do coeficiente s_c .

Desenvolvimento da resistência	Coeficiente s_c
rápido	$s_c \leq 0,25$
médio	$0,25 < s_c \leq 0,44$
lento	$0,44 < s_c \leq 0,69$
muito lento	$s_c > 0,69$

Fonte: Elaborada pelo autor com base na Tabela 4.13.

Observa-se que, os valores dos coeficientes s_c apresentados na Tabela 4.14 estão em sintonia com o estabelecido no *fib* Model Code 2020, exceção feita ao desenvolvimento da resistência “muito lento” ($s_c \geq 0,69$) que apresenta a longo prazo um crescimento ainda superior ao prescrito pelo referido código modelo. Portanto, de maneira geral e salvo raras exceções, todas as classificações de desenvolvimento da resistência apresentadas e discutidas neste subitem, encontram-se dentro das faixas estabelecidas no atual código modelo de norma europeu (FIB, 2023).

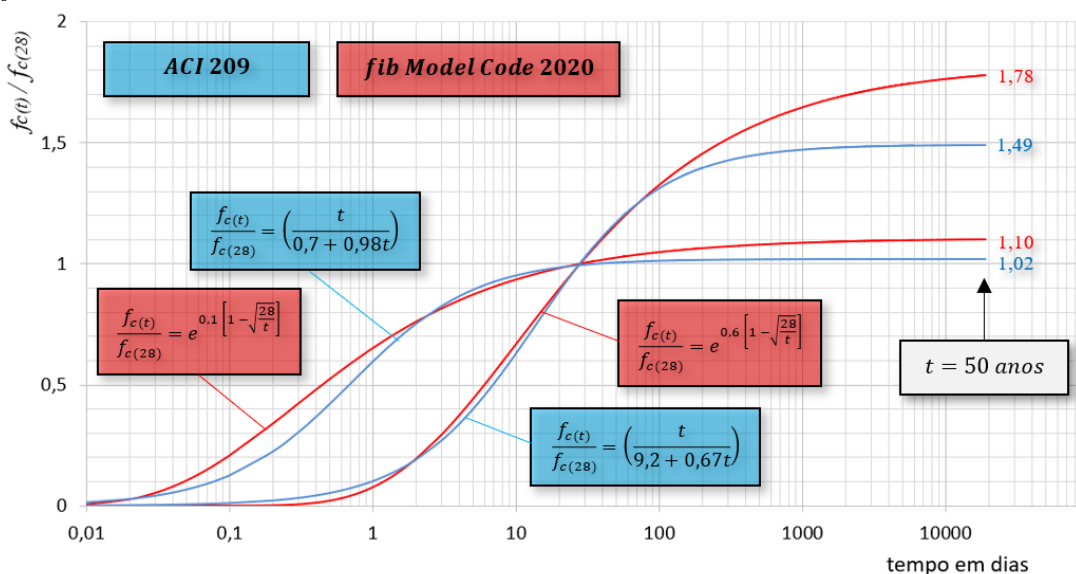
4.10 Análise comparativa entre os modelos propostos pelo ACI Committee 209 e *fib* Model Code 2020

Os dois principais modelos atualmente utilizados para descrever o comportamento da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo são os propostos pelo ACI Committee 209 e pelo *fib* Model Code for Concrete Structures 2020. Isso não significa dizer que modelos de Abrams ou de Powers estão ultrapassados e em desuso. Pelo contrário, esses modelos ainda são muito utilizados em outros contextos, como por exemplo, quando dos estudos racionais de dosagem e quando do estudo da estrutura interna do concreto, respectivamente.

Dessa maneira, apresenta-se neste subitem uma análise comparativa entre os modelos propostos pelo ACI 209 e *fib* Model Code 2020, lembrando que são das premissas deste último que se deriva o modelo da atual norma brasileira ABNT NBR 6118:2023 “*Projeto de estruturas de concreto*”. Entretanto, convém registrar que o modelo nacional é mais limitado uma vez que não permite estimar resistência em idades superiores aos 28 dias, ou seja, no caso do modelo nacional, $t_{ref} \leq 28$ dias.

No gráfico da Figura 4.21 observa-se o desenvolvimento da resistência à compressão ao longo do tempo conforme preconizado pelos modelos americano e europeu, considerando as curvas que limitam os modelos (envoltórias).

Figura 4.21 - Envoltórias dos modelos teóricos propostos pelo ACI Committee 209 e *fib* Model Code for Concrete Structures 2020.



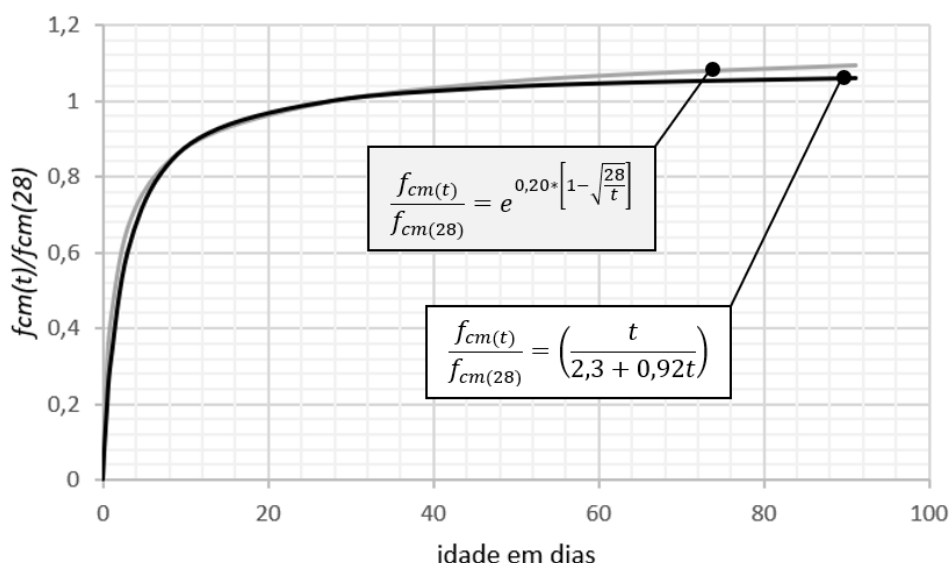
Fonte: Elaborada pelo autor com base no ACI (2008) e FIB (2023).

Mediante análise comparativa dos modelos, observa-se que:

- ✓ no modelo adotado pelo *fib* Model Code 2020, as resistências últimas são atingidas em idades mais avançadas;
- ✓ o modelo proposto pelo *fib* Model Code 2020 permite uma maior variação do desenvolvimento da resistência em idades avançadas, enquanto para as idades compreendidas entre 2 dias $\leq t \leq 28$ dias, as curvas do ACI 209 e do *fib* Model Code 2020, praticamente se confundem.

Dando sequência à análise comparativa, como exemplo, no gráfico da Figura 4.22 são apresentadas duas curvas teóricas obtidas para concretos de classe de resistência C40, produzidos com cimento equivalentes de alta resistência inicial (uma com cimento europeu tipo CR e outra cimento americano tipo III), ambos submetidos à cura úmida a temperatura constante de 20°C e controlados em uma idade de referência de 28 dias ($t_{ref} = 28$ dias).

Figura 4.22 - Curvas teóricas de crescimento relativo da resistência para concreto C40, conforme modelos ACI 209 (curva na cor preta) e *fib* Model Code 2020 (curva na cor cinza).



Fonte: Boni e Helene (2022)¹⁰⁷, p. 13.

Nota-se graficamente, que as curvas dos dois diferentes modelos praticamente se confundem nas idades inferiores aos 28 dias, com um pequeno descolamento das curvas teóricas nas primeiras idades (até os 4 dias) e nas idades mais avançadas.

¹⁰⁷ BONI, Ricardo; HELENE, Paulo. O desenvolvimento da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo de acordo com o modelo proposto pelo ACI. Apresentação, estudo e análise comparativa com o modelo ABNT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 63., 2022, Brasília. **Anais do 63 CBC**. Brasília: Ibracon, 2022. p. 1-16.

Análises dessa natureza foram realizadas entre os modelos americano e europeu por Boni e Helene (2022), onde constatou-se que os modelos em questão são aderentes, principalmente nas primeiras idades, na medida que é possível compatibilizar os coeficientes s_c e a/b .

4.11 Modelo da influência da temperatura interna do concreto no desenvolvimento da resistência à compressão

A variação da temperatura do concreto e seus efeitos durante o desenvolvimento da resistência à compressão é uma questão importante a ser discutida.

Conforme mencionado anteriormente neste trabalho o modelo teórico de crescimento da resistência à compressão do concreto preconizado pelo *fib* Model Code 2020 permite que a idade do concreto (t) seja ajustada em função da temperatura, por meio da Equação 4.38.

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{\left[13,65 - \frac{4000}{273+T(\Delta t_i)}\right]} \quad (4.38)$$

Onde:

t : idade do concreto ajustada em função da temperatura, em dias;

Δt_i : é o número de dias nos quais a temperatura $T_{(\Delta t_i)}$ prevalece;

$T_{(\Delta t_i)}$: é a temperatura média do concreto em °C durante o intervalo Δt_i .

Registra-se que a Equação 4.38, por se tratar da somatória de temperaturas médias $T_{(\Delta t_i)}$ durante intervalos de tempo Δt_i , permite que variações de temperatura ao longo das horas (se necessário adotar rigor), dos dias e dos meses sejam consideradas, resultando em um tempo t ajustado em função destas variações.

O modelo apresentado anteriormente é baseado no conceito de maturidade do concreto, que leva em conta o efeito combinado do tempo, da temperatura e sua influência no grau de hidratação da pasta de cimento. Schindler *et al.* (2006)¹⁰⁸ registram que a maturidade do concreto pode ser definida de maneira simplificada por

¹⁰⁸ SCHINDLER, Anton K. *et al.* **EVALUATION OF THE MATURITY METHOD TO ESTIMATE CONCRETE STRENGTH**. Auburn: Department of Civil Engineering at Auburn University, 2006. 295 p.

meio do produto do tempo pela temperatura, de acordo com a função linear de maturidade Nurse-Saul (NSM), concebida no final da década de 1940, conforme Equação 4.46.

$$M_{(t)} = \sum_{i=1}^n (T_{(\Delta t_i)} - T_0) \Delta t_i \quad (4.46)$$

Onde:

$M_{(t)}$: é a maturidade do concreto, em °C.dia;

Δt_i : é o intervalo de tempo (em dias) no qual a temperatura $T_{(\Delta t_i)}$ prevalece;

$T_{(\Delta t_i)}$: é a temperatura média do concreto em °C durante o intervalo Δt_i ;

T_0 : é a temperatura de base, em °C, abaixo da qual não ocorre hidratação do cimento Portland. De acordo com Carino e Lew (2001)¹⁰⁹ essa temperatura é considerada igual a -10°C.

A função Nurse-Saul e seus conceitos foram largamente utilizados no cálculo do índice de maturidade do concreto e do fator temperatura-tempo desde então. Inclusive, trata-se de função atualmente normalizada, como consta no Capítulo 6 “*Maturity Functions*” da ASTM C1074-11 “*Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*” (ASTM, 2011)¹¹⁰.

Em setembro de 1954, um importante trabalho sobre o tema, denominado “*Heat hydration in concrete*” foi publicado pelo engenheiro Erik Rastrup. De acordo com Schutter (2004)¹¹¹, o referido trabalho introduziu o conceito de tempo equivalente (t_e), admitindo que o concreto atinge o mesmo grau de maturidade caso seja mantido a uma temperatura de referência (T_r) até a idade t_e . Sendo assim, a função maturidade de Nurse-Saul pode ser representada considerando a temperatura de referência e o tempo equivalente da seguinte maneira:

$$\sum_{i=1}^n \Delta t_i (T_{(\Delta t_i)} - T_0) = (T_r - T_0) * t_e$$

¹⁰⁹ CARINO, N. J.; LEW, H. S. The Maturity Method: from theory to application. **ASCE Structures Congress** 2001. pp. 1-19. Washington, D.C., 2001. ISBN 978-0- 7844-0558-1.

¹¹⁰ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1074-11**: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. West Conshohocken: Astm International, 2011. 10 p.

¹¹¹ SCHUTTER, Geert de.. Applicability of degree of hydration concept and maturity method for thermo-visco-elastic behaviour of early age concrete. **Cement & Concrete Composites**, Oxford, n. 26, p. 437-443, 2004.

$$t_e = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i (T_{(\Delta t_i)} - T_0)}{(T_r - T_0)} \quad (4.47)$$

Onde:

t_e : é o tempo equivalente, em dias;

Δt_i : é o intervalo de tempo (em dias) no qual a temperatura $T_{(\Delta t_i)}$ prevalece;

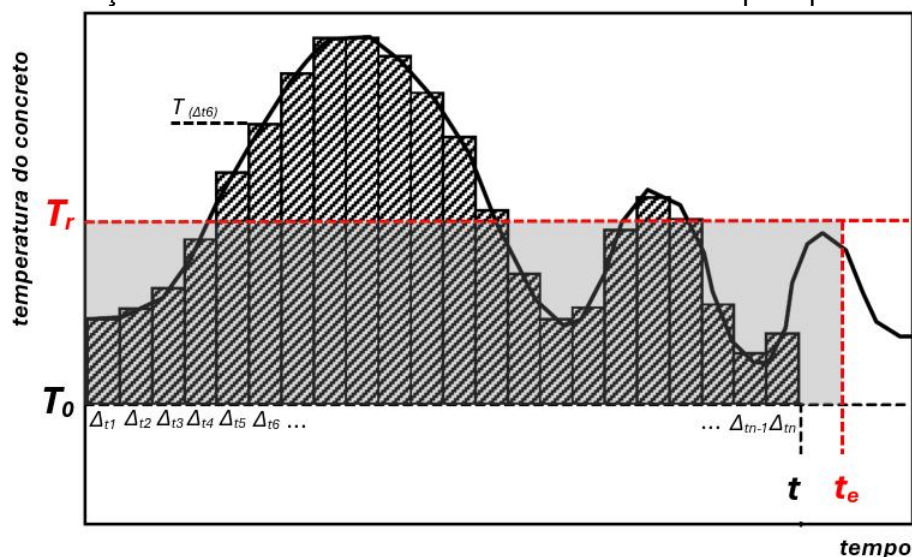
$T_{(\Delta t_i)}$: é a temperatura média em °C durante o intervalo de tempo Δt_i ;

T_0 : é a temperatura de base, abaixo da qual não ocorre hidratação do cimento Portland;

T_r : temperatura de referência, em °C. De acordo com Carino e Lew (2001), esta temperatura pode variar entre $20^\circ\text{C} \leq T_r \leq 80^\circ\text{C}$. Para efeito de compatibilidade com os modelos europeu e nacional, neste trabalho, adotar-se-á sempre temperatura de referência $T_r = 20^\circ\text{C}$, como será demonstrado a seguir.

Para melhor entendimento da aplicação dos conceitos de tempo equivalente (t_e) e de temperatura de referência (T_r), na Figura 4.23 é possível observar graficamente o modelo proposto por Rastrup em 1954, a partir da função maturidade de Nurse-Saul. Ou seja, a área localizada sob a curva de variação de temperatura $T_{(\Delta t_i)}$ até o tempo t (área hachurada com linhas diagonais), deve ser igual a área localizada sob a temperatura de referência constante T_r até o tempo equivalente t_e (área limitada pela linha vermelha pontilhada e hachurada em cinza claro).

Figura 4.23 - Representação gráfica do histórico de tempo-temperatura do concreto, de acordo com a função maturidade Nurse-Saul e do conceito de tempo equivalente (t_e).



Fonte: Carino e Lew (2001), p. 4.

Mehta e Monteiro (2014) consideram que o efeito da temperatura nas primeiras idades exerce uma influência na resistência à compressão do concreto a longo prazo. Temperaturas mais altas causam uma aceleração das reações de hidratação resultando em um aumento no desenvolvimento das resistências nas primeiras idades, porém resistências finais mais baixas, devido à desorganização da microestrutura dos cristais hidratados.

Para o caso de temperaturas mais baixas ocorre o oposto, uma vez que são produzidas lentamente microestruturas mais finas, organizadas e uniformes na pasta de cimento com baixa porosidade, resultando em um concreto de menor resistência nas primeiras idades e com maior resistência final nas idades mais avançadas.

As mesmas considerações sobre a influência da temperatura no desenvolvimento da resistência à compressão do concreto também são mencionadas por Neville (2016).

Dessa maneira, visando minimizar os efeitos adversos da temperatura anteriormente mencionados e as limitações da função linear da maturidade, outros trabalhos foram desenvolvidos. Freiesleben-Hansen e Pedersen (1977 *apud* Peres *et al.*, 2007, p. 134)¹¹² propuseram a utilização da função de Arrhenius, que leva em conta a energia de ativação (E) do material para a determinação do tempo equivalente:

$$t_e = \sum_{i=1}^n e^{\frac{-E}{R} * \left[\frac{1}{T_{(\Delta t_i)}} - \frac{1}{T_r} \right]} \Delta t_i \quad (4.48)$$

Onde:

t_e : idade do concreto ajustada em função da temperatura, em dias;

Δt_i : é o número de dias nos quais a temperatura T prevalece;

T_r : temperatura de referência em K;

$T_{(\Delta t_i)}$: é a temperatura média em K, durante o intervalo de tempo Δt_i ;

E: energia de ativação, em J/mol, sendo:

$E = 33.500 \text{ J/mol}$, para $T_{(\Delta t_i)} \geq 20 \text{ °C}$;

$E = 33.500 + 1470*(20 - T_{(\Delta t_i)}) \text{ J/mol}$, para $T_{(\Delta t_i)} < 20 \text{ °C}$;

R: constante universal dos gases, igual a 8,314 J/mol.K.

¹¹² PERES, L. D. P. *et al.* Avaliação da resistência à compressão do concreto em vigas pré-moldadas submetidas à cura térmica por meio do Método da Maturidade. **IBRACON Structural Journal**, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 121-142, mar. 2007.

Com base no modelo de tempo equivalente proposto por Freiesleben-Hansen e Pedersen (Equação 4.48) é fácil notar a origem da equação de ajuste de temperatura preconizada pelo *fib* Model Code 2020, Equação 4.38. Para tanto, basta utilizar uma energia de ativação (E) de aproximadamente 33.500 J/mol e uma temperatura de referência $T_r = 20^\circ\text{C}$.

Portanto, analisando a equação proposta pelo *fib* Model Code 2020, para uma temperatura constante de 20°C , ou seja, $T_{(\Delta t_i)} = 20^\circ\text{C}$, não há necessidade de ajuste da idade t , uma vez que, neste caso, a equação pode ser simplificada da seguinte maneira:

$$t_{20^\circ\text{C}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{\left[13,65 - \frac{4000}{273+20}\right]} \rightarrow t_{20^\circ\text{C}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{[0]} \rightarrow t_{20^\circ\text{C}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i * 1 \rightarrow t_{20^\circ\text{C}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$$

$$t_{20^\circ\text{C}} = t$$

Ou seja, por exemplo, para um concreto controlado aos 28 dias de idade ($t_{ref} = 28$ dias), de qualquer classe de resistência, produzido com qualquer tipo de cimento com temperatura constante de 20°C , tem-se:

$$\frac{f_{c(t; 20^\circ\text{C})}}{f_{c(t_{ref})}} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}}\right] * \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}}\right)\right\}} \rightarrow \frac{f_{c(t; 20^\circ\text{C})}}{f_{c(28)}} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right] * \left(\sqrt{\frac{28}{28}}\right)\right\}} \rightarrow f_{c(t; 20^\circ\text{C})} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]\right\}} * f_{c(28)}$$

Entretanto, se este mesmo concreto permanecer a uma temperatura constante de 40°C , o valor de t (idade do concreto, em dias) deve ser ajustado em função desta temperatura. Neste caso a expressão matemática a ser adotada assumiria o seguinte formato:

$$t_{40^\circ\text{C}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{\left[13,65 - \frac{4000}{273+40}\right]} \rightarrow t_{40^\circ\text{C}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{0,87} \rightarrow t_{40^\circ\text{C}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i 2,39$$

$$t_{40^\circ\text{C}} = 2,39 * t_{20^\circ\text{C}} \rightarrow t_{40^\circ\text{C}} = 2,39 * t$$

Logo, ajustando o valor de t de acordo com a $T_{(\Delta t_i)} = 40^\circ\text{C}$, obtém-se:

$$f_{c(t; 40^\circ\text{C})} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{2,39 * t}}\right]\right\}} * f_{c(28)}$$

Analogamente, se o mesmo concreto permanecer a uma temperatura constante de 10°C, a expressão a ser utilizada deve ser igual a:

$$t_{10^{\circ}\text{C}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{\left[13,65 - \frac{4000}{273+10}\right]} \rightarrow t_{10^{\circ}\text{C}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{-0,48} \rightarrow t_{10^{\circ}\text{C}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i 0,62$$

$$t_{10^{\circ}\text{C}} = 0,62 * t_{20^{\circ}\text{C}} \rightarrow t_{10^{\circ}\text{C}} = 0,62 * t$$

Portanto, neste caso, ajustando o valor de t de acordo com a $T_{(\Delta t_i)} = 10^{\circ}\text{C}$, obtém-se:

$$f_{c(t; 10^{\circ}\text{C})} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{0,62 * t}}\right]\right\}} * f_{c(28)}$$

Como exemplo quantitativo de aplicação do modelo *fib* Model Code 2020, um concreto amassado com cimento CN e classe de resistência C40, ou seja, representado pelo coeficiente $s_c = 0,4$, a uma temperatura constante de 40°C, apresentará uma resistência à compressão aos 28 dias de idade, igual a 1,15 vezes maior que o mesmo concreto com temperatura constante de 20°C, uma vez que:

$$\frac{f_{c(t; 40^{\circ}\text{C})}}{f_{c(t; 20^{\circ}\text{C})}} = \frac{e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{2,39 * t}}\right]\right\}} * f_{c(28)}}{e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]\right\}} * f_{c(28)}} \rightarrow \frac{f_{c(28; 40^{\circ}\text{C})}}{f_{c(28; 20^{\circ}\text{C})}} = \frac{e^{\left\{0,4 * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{2,39 * 28}}\right]\right\}}}{e^{\left\{0,4 * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{28}}\right]\right\}}} \rightarrow f_{c(28; 40^{\circ}\text{C})} = 1,15 * f_{c(28; 20^{\circ}\text{C})}$$

Da mesma maneira, para uma temperatura constante de 10°C, tem-se:

$$\frac{f_{c(t; 10^{\circ}\text{C})}}{f_{c(t; 20^{\circ}\text{C})}} = \frac{e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{0,62 * t}}\right]\right\}} * f_{c(28)}}{e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]\right\}} * f_{c(28)}} \rightarrow \frac{f_{c(28; 10^{\circ}\text{C})}}{f_{c(28; 20^{\circ}\text{C})}} = \frac{e^{\left\{0,4 * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{0,62 * 28}}\right]\right\}}}{e^{\left\{0,4 * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{28}}\right]\right\}}} \rightarrow f_{c(28; 10^{\circ}\text{C})} = 0,90 * f_{c(28; 20^{\circ}\text{C})}$$

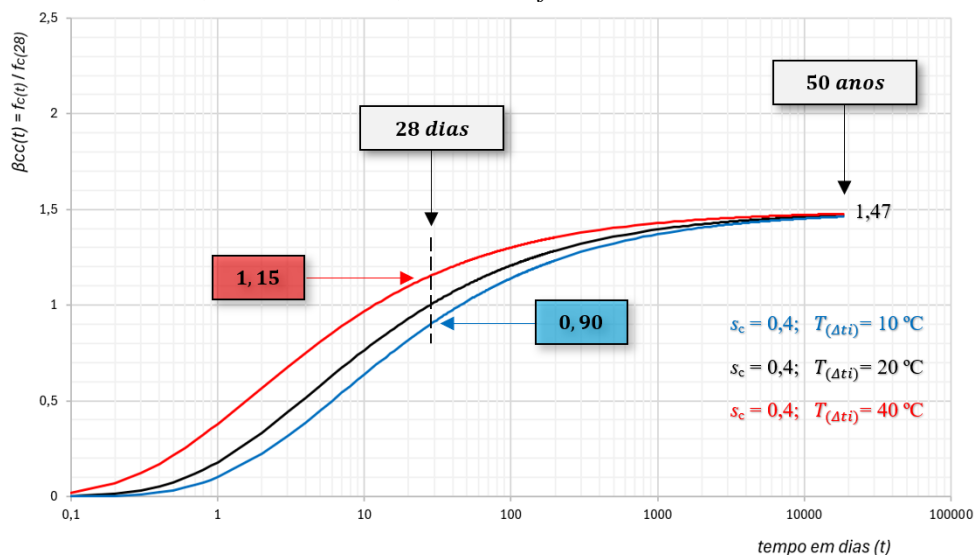
Salienta-se que a variação percentual da resistência à compressão em relação a idade de 28 dias não depende única e exclusivamente da variação da temperatura. É possível notar que o efeito da temperatura do concreto sobre o desenvolvimento da resistência à compressão é mais significativo quanto maior for o valor do coeficiente s_c , ou seja, depende da natureza do cimento e da relação w/c (sua resistência).

Por exemplo, para um concreto de $s_c = 0,5$, com temperaturas constantes de 10°C e 40°C (ou seja, mesmas temperaturas do exemplo anterior que considerava $s_c = 0,4$), obtém-se, aos 28 dias de idade, as seguintes resistências: $f_{c(28; 10^{\circ}\text{C})} = 0,87 *$

$f_{c(28; 20^{\circ}\text{C})}$ e $f_{c(28; 40^{\circ}\text{C})} = 1,19 * f_{c(28; 20^{\circ}\text{C})}$, respectivamente, ou seja, variação superior ao do exemplo anterior que apontava valores de resistência de $f_{c(28; 10^{\circ}\text{C})} = 0,90 * f_{c(28; 20^{\circ}\text{C})}$ e $f_{c(28; 40^{\circ}\text{C})} = 1,15 * f_{c(28; 20^{\circ}\text{C})}$.

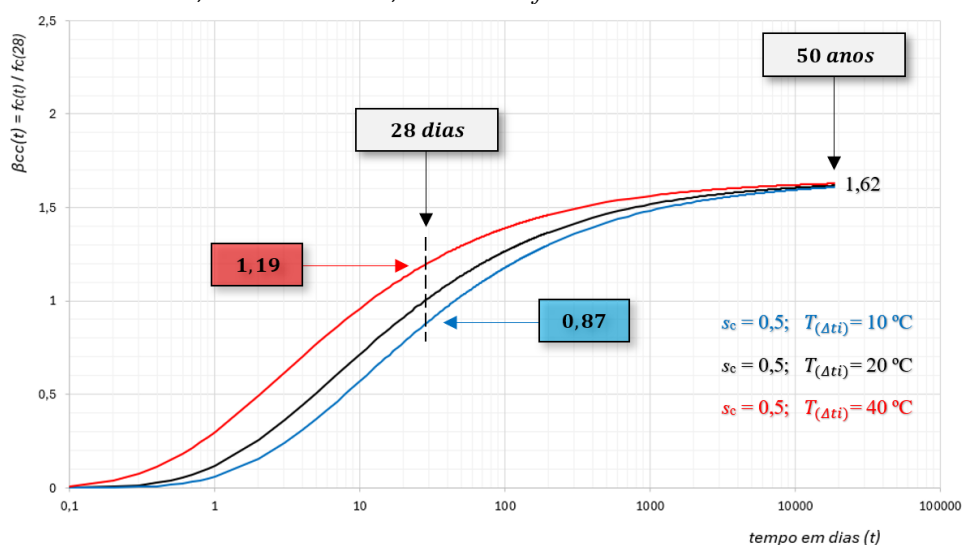
As Figuras 4.24 e 4.25 ilustram a situação descrita no parágrafo anterior, para temperaturas de 10 °C, 20 °C e 40 °C, coeficientes de crescimento iguais a 0,4 e 0,5, respectivamente. Em todos os casos, o valor da resistência relativa está associado aos 28 dias, a partir da curva que se desenvolve a uma temperatura de 20 °C, ou seja, curva representada na cor preta.

Figura 4.24 – Curvas de crescimento relativo da resistência considerando $s_c = 0,4$ e temperaturas de 10 °C, 20 °C e 40 °C, conforme *fib* Model Code 2020.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.25 – Curvas de crescimento relativo da resistência considerando $s_c = 0,5$ e temperaturas de 10 °C, 20 °C e 40 °C, conforme *fib* Model Code 2020.



Fonte: Elaborada pelo autor.

É imperativo registrar que a utilização da expressão do tempo equivalente para o ajuste do modelo de desenvolvimento da resistência à compressão devido à variação da temperatura adotado pelo *fib* Model Code 2020 apresenta limitações, uma vez que em idades avançadas, a resistência obtida apresenta valores relativos que não refletem a realidade. Conforme registrado no subitem 3.5 “*Temperatura do concreto*”, temperaturas elevadas iniciais aceleram as reações químicas de hidratação nas primeiras idades e diminuem as resistências mecânicas finais. No caso de baixas temperaturas iniciais, observa-se o contrário. Tal comportamento não é observado graficamente nas Figuras 4.24 e 4.25, que apresentam resistências relativas finais idênticas, independente da temperatura .

Sendo assim, este autor entende que a consideração da maturidade ou a influência da temperatura deve ser empregado apenas nas primeiras idades, até os 7 dias, aproximadamente, a depender das demais variáveis.

Nesse contexto, o modelo americano proposto pelo ACI Committee 209 é mais adequado, pois não considera o conceito de tempo equivalente e sim variações dos parâmetros a e b que, neste modelo, definem o desenvolvimento das curvas de crescimento da resistência à compressão do concreto, em função do tipo de cura: térmica ou úmida, sendo que a primeira eleva a temperatura interna do concreto e a segunda não. Portanto, ao contrário do modelo europeu, neste caso, resistências mais elevadas nas primeiras idades conduzem, sempre, a menores resistências em idades avançadas e o inverso também se verifica.

Vale registrar que o *fib* Model Code 2010, em seu subitem 5.1.10 “*Temperature effects*” permite que a variação da resistência à compressão do concreto em função da temperatura, seja obtida sem considerar o conceito de tempo ajustado da seguinte maneira:

$$f_{c(T)} = f_c * (1,06 - 0,003 * T) \quad (4.49)$$

Onde:

$f_{c(T)}$: resistência à compressão aos 28 dias, em MPa, na temperatura T , em °C;

f_c : resistência à compressão aos 28 dias, em MPa, na temperatura $T = 20^\circ\text{C}$;

T : temperatura do concreto, em °C , no intervalo $0^\circ\text{C} \leq T \leq 80^\circ\text{C}$.

Sendo assim, de acordo com este modelo, para um concreto com temperatura constante de 10°C , sua resistência aos 28 dias de idade será de: $f_{c(10^\circ\text{C})} = f_c * (1,06 - 0,003 * 10) \rightarrow f_{c(10^\circ\text{C})} = 1,03 * f_c$, ou seja, 3% superior à resistência do concreto

com temperatura de 20°C. Analogamente, para uma temperatura de 40°C, sua resistência aos 28 dias de idade será de: $f_{c(40^{\circ}\text{C})} = f_c * (1,06 - 0,003 * 40) \rightarrow f_{c(40^{\circ}\text{C})} = 0,94 * f_c$, ou seja, 94% da resistência a 20°C.

Nota-se portanto que, temperaturas mais elevadas do concreto resultam em resistências mais baixas aos 28 dias, sendo, desta maneira, este modelo do *fib* Model Code 2010, apesar de limitado, mais coerente com a realidade, comprovada por vários estudos experimentais de pesquisadores renomados, a citar por exemplo Neville (2016) e Mehta e Monteiro (2014).

4.12 Modelo da influência da carga mantida

Até aqui foram apresentadas expressões teóricas que visam representar o crescimento da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo em condições relaxadas. Entretanto, quando o concreto é submetido a uma carga mantida e elevada, ocorre uma redução de sua resistência à compressão com o tempo.

De acordo com o *fib* Model Code 2020 (FIB, 2023), a carga mantida está associada a uma elevada tensão de compressão, sustentada por mais de 20 minutos e de magnitude superior a 75% da resistência à compressão do concreto em condições relaxadas, na idade de aplicação da carga. Ainda, o referido código modelo considera que essa percentagem pode variar de 70 a 80%, a depender da classe de resistência do concreto.

Para melhor entendimento, faz-se necessário estudar as funções de crescimento e decréscimo da resistência.

Segundo o *fib* Model Code 2020, conforme apresentado em seu subitem 14.9.3.1 “*Sustained compressive strength*”, o modelo matemático de redução da resistência $[\beta_{c,sus}(t, t_0)]$ é representado por:

$$\beta_{c,sus}(t, t_0) = \beta_{t_0}(t_0) + [1 - \beta_{t_0}(t_0)] * \left[1 + 10^4 \frac{(t-t_0)}{t_0}\right]^{-0,1} \quad (4.50)$$

Onde:

$\beta_{c,sus}(t, t_0)$: função que representa a diminuição relativa da resistência ao longo do tempo em decorrência da carga mantida. Válida para $(t - t_0) > 0,015$ dias ($\approx$ 20 minutos).

$\beta_{t_0}(t_0)$: parâmetro que considera a maturidade do concreto, dado por:

$$\beta_{t_0}(t_0) = 0,64 + 0,01 * \ln(t_0) \quad (4.51)$$

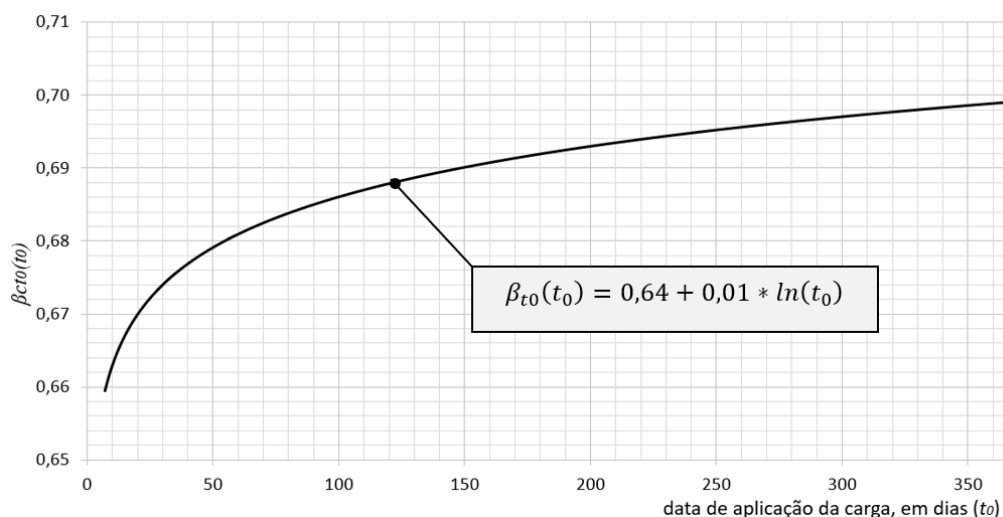
t_0 : idade de carregamento do concreto, em dias. $t_0 \geq 7$ dias.

$(t - t_0)$: tempo de carga mantida, em dias. Para $(t - t_0) > 10$ anos, adotar sempre $(t - t_0) = 3650$ dias.

Nota-se, neste modelo, três aspectos importantes, a saber:

- ✓ o modelo é valido somente para cargas aplicadas a partir dos 7 dias de idade ($t_0 \geq 7$ dias);
- ✓ para tempo de cargas mantidas superiores a 10 anos, adota-se sempre a partir desta idade $(t - t_0) = 3650$ dias;
- ✓ a introdução de um parâmetro de maturidade do concreto $\beta_{t_0}(t_0)$, que corresponde a uma função que depende da data de aplicação da carga (t_0), assumindo valores de 0,66 e 0,70, para cargas aplicadas aos 7 e 365 dias de idade, respectivamente. Registra-se que a variação deste parâmetro é mais significativa nas primeiras idades, conforme apresentado graficamente na Figura 4.26.

Figura 4.26 - Variação do parâmetro de maturidade $\beta_{t_0}(t_0)$ para cargas aplicadas entre os 7 dias e 1 ano de idade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Equação 4.50, que representa o modelo de redução da resistência à compressão proposto pelo *fib* Model Code 2020, observa-se outra importante característica que se reflete no efeito combinado do crescimento e do decréscimo da resistência. Nota-se que o produto $\beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0)$, não converge para um valor comum e único em idades avançadas, uma vez que o parâmetro de

decréscimo da resistência $\beta_{c,sus}(t, t_0)$ assume valores distintos, a depender da idade de aplicação da carga (t_0).

O cenário descrito no parágrafo anterior pode ser demonstrado matematicamente. Para tanto, basta analisar a Equação 4.50 para um tempo muito longo. Como premissa, o modelo admite que o valor máximo de $(t - t_0)$ é de 3650 dias, dessa maneira, tem-se:

$$\beta_{c,sus}(t, t_0) = \beta_{t0}(t_0) + [1 - \beta_{t0}(t_0)] * \left[1 + 10^4 \frac{(t - t_0)}{t_0} \right]^{-0,1}$$

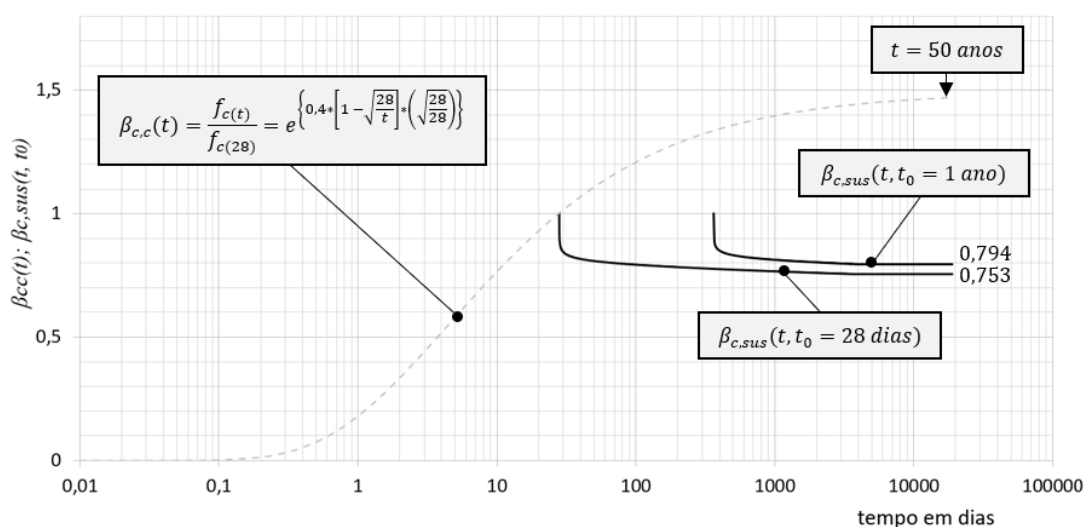
$$\beta_{c,sus}(t, t_0) = \beta_{t0}(t_0) + [1 - \beta_{t0}(t_0)] * [t_0]^{0,1} * \left[\frac{1}{t_0 + 10^4 * (3650)} \right]^{0,1}$$

Como $t_0 \ll 10^4 * (3650)$, pode-se admitir que: $\left[\frac{1}{t_0 + 10^4 * (3650)} \right]^{0,1} \sim 0,175$. Logo:

$$\beta_{c,sus}(t, t_0) = \beta_{t0}(t_0) + [1 - \beta_{t0}(t_0)] * [t_0]^{0,1} * 0,175$$

Logo, para $t_0 = 28$ dias, o valor de $\beta_{c,sus}(t, t_0)$ aos 50 anos é de 0,753. Analogamente, para idade de aplicação da carga mantida de $t_0 = 365$ dias, tem-se: $\beta_{c,sus}(t, t_0) = 0,794$, conforme apresentado graficamente na Figura 4.27.

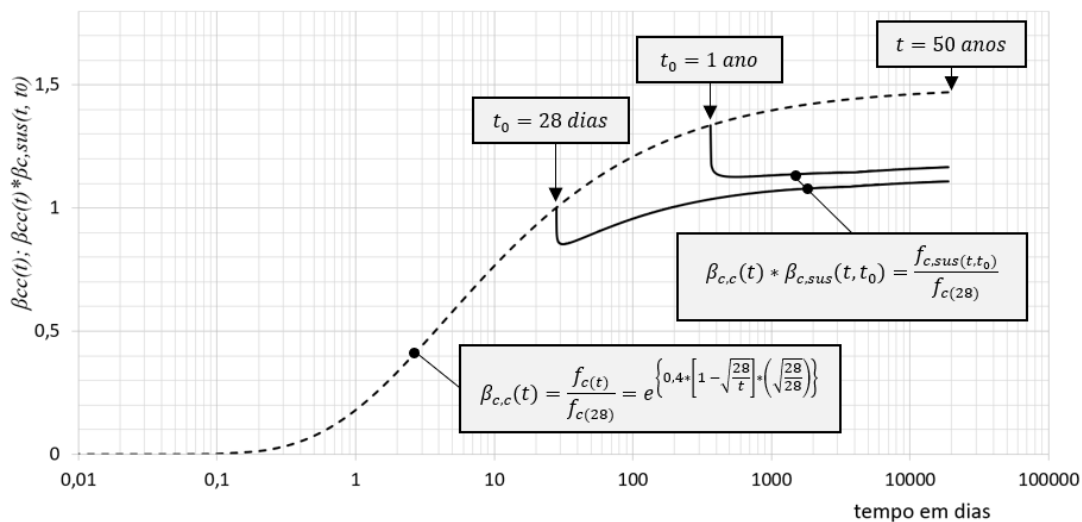
Figura 4.27 - Efeito do decréscimo relativo da resistência à compressão em função da carga mantida $\beta_{c,sus}(t, t_0)$, aplicada aos 28 e 365 dias, conforme equação proposta pelo *fib* Model Code 2020.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando o efeito combinado do crescimento e decréscimo da resistência, como $\beta_{c,sus}(t, t_0)$ não converge para o mesmo valor em idades avançadas, o mesmo acontece com o produto $\beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0)$, conforme apresentado graficamente na Figura 4.28.

Figura 4.28 - Efeito combinado do crescimento e do decréscimo relativos da resistência à compressão do concreto produzido com cimento de endurecimento normal ($s_c = 0,4$), de acordo com a idade de aplicação da carga mantida. Modelo *fib* Model Code 2020.

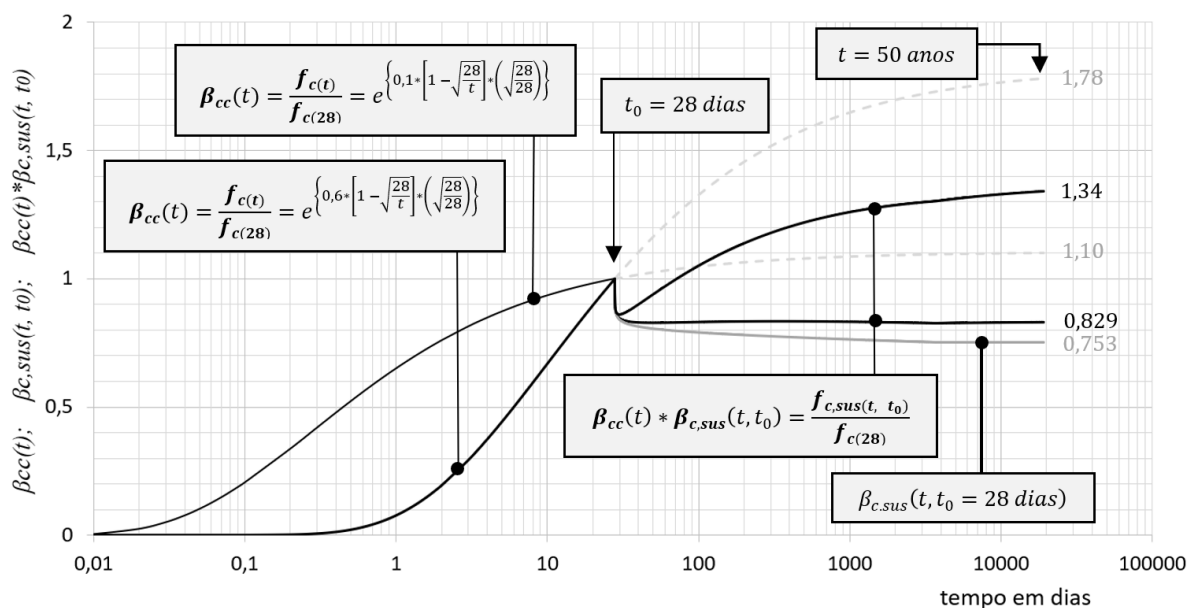


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.28, analisando a curva de carga aplicada aos 28 dias, nota-se que para um concreto $s_c = 0,4$ ocorre uma diminuição de resistência da ordem de 15%, um pouco depois da aplicação da carga, ou seja, $\beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0) = 0,85$ no referido momento. Entretanto, em decorrência do crescimento da resistência, aos 180 dias de idade já é possível observar que esta perda é recuperada ($f_{c,sus}(t; t_0)/f_{c(28)} = 1$). Para cargas aplicadas aos 365 dias, nota-se que a razão $f_{c,sus}(t; t_0)/f_{c(28)} > 1$, sempre.

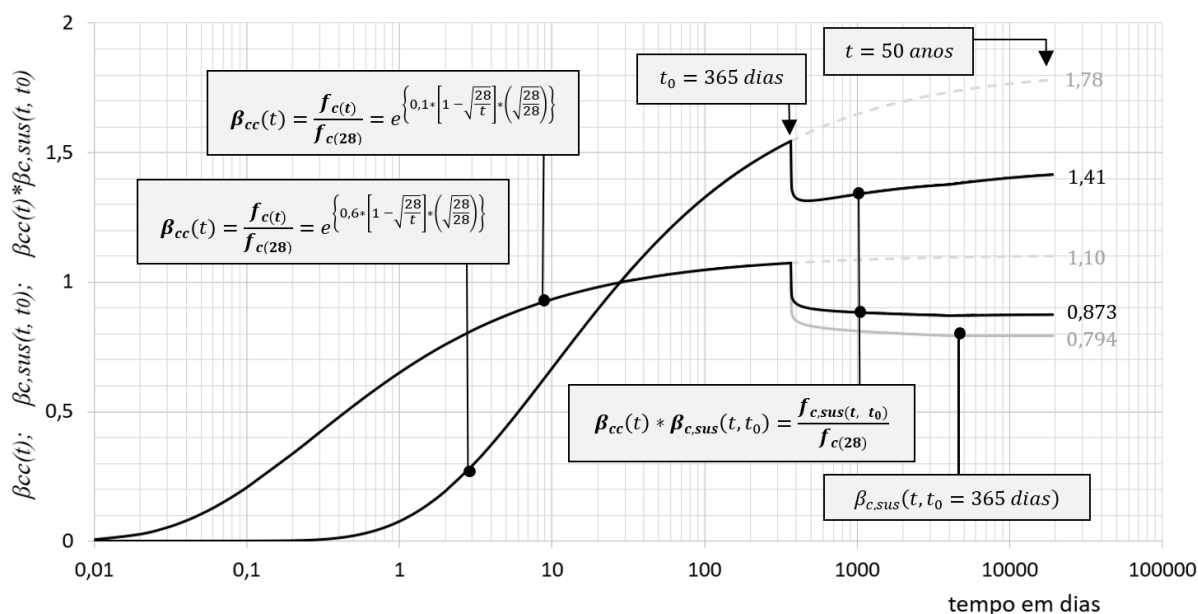
Visando o melhor entendimento dos valores máximos e mínimos de resistência à compressão que se desenvolvem ao longo do tempo (até os 50 anos de idade) em decorrência da variabilidade dos tipos de cimento Portland, classe de resistência e outras variáveis inerentes, foram representadas nas Figuras 4.29 e 4.30 as envoltórias máximas e mínimas (linhas contínuas em preto), considerando $0,1 \leq s_c \leq 0,6$ e cargas aplicadas aos 28 e 365 dias de idade.

Figura 4.29 - Envolvórias das curvas de desenvolvimento da resistência à compressão para cargas aplicadas aos 28 dias de idade, considerando concretos com $0,1 \leq s_c \leq 0,6$. Modelo *fib* Model Code 2020.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.30 - Envolvórias das curvas de desenvolvimento da resistência à compressão para cargas aplicadas aos 365 dias (1 ano) de idade, considerando concretos com $0,1 \leq s_c \leq 0,6$. Modelo *fib* Model Code 2020.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dada as condições de contorno do modelo, observa-se que a condição crítica de resistência do concreto ocorre quando da aplicação de carga elevada e mantida em idades precoces ($7 \text{ dias} \leq t_0 \leq 28 \text{ dias}$).

Sobre este assunto, Fusco (2008) afirma que, quando os concretos são carregados de forma permanente com pouca idade, se a ruptura não ocorrer dentro de certo prazo (cerca de 6 h), ela dificilmente ocorrerá, pois, a partir deste prazo, a velocidade do efeito de hidratação começa a superar a do efeito de permanência de carga.

Por fim, vale registrar que no ano de 1993 em Simpósio realizado na Escola Politécnica da USP, Helene (1993)¹¹³, demonstrou que a resistência devido ao efeito combinado do crescimento e do decréscimo devido à carga mantida atinge valores mínimos que variam entre $0,78 \leq \beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0) \leq 1,02$, a depender das características do concreto utilizado, da data de aplicação da carga. De posse dessas conclusões recomendava maior flexibilidade na data de referência e controle da resistência do concreto, propondo 63 dias como idade ideal de ensaio do corpo de prova para obtenção da resistência característica à compressão do concreto estimada $(f_{ck,est})$ ¹¹⁴, para edifícios residenciais e comerciais convencionais.

4.13 Resumo dos estudos e modelos de comportamento apresentados

Cada um dos modelos teóricos de desenvolvimento da resistência à compressão do concreto apresentados até aqui possui uma particularidade e estão associados a uma ou mais variáveis, também chamadas de fatores intervenientes, que influenciam notadamente seu comportamento.

Para melhor entendimento e organização cronológica, a Tabela 4.15 resume os pesquisadores, os modelos de comportamento discutidos nesta dissertação, assim como os estudos teóricos relacionados com o tema e seus respectivos fatores intervenientes.

¹¹³ HELENE, Paulo. A Resistência do Concreto sob Carga Mantida e a Idade de Estimativa de Resistência Característica. In: III SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1993, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Epusp, 1993. p. 271-282.

¹¹⁴ Para a determinação do valor da resistência característica à compressão estimada consultar subitem 6.2 “Ensaio de resistência à compressão” da norma ABNT NBR 12655:2022 “Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento” (ABNT, 2022).

Tabela 4.15 – Modelos de comportamento, estudos teóricos e os fatores intervenientes.

Modelo de comportamento e estudos teóricos	Ano	Fatores intervenientes
Féret	1892	Volume absoluto de cimento, água e de vazios
Abrams	1919	Relação água/cimento (w/c)
	1922	Influência da finura do cimento na hidratação
Bolomey	1925	Relação água/cimento (w/c)
Slater	1926	Modelo de crescimento relativo
Bogue	1929	Composição química do cimento
Swenson, Wagner e Pigman	1935	Influência da finura do cimento na hidratação
Carlson	1937	Composição química do cimento e sua influência na resistência à compressão
Amaral Filho	1945	Modelo de crescimento relativo
Powers	1947	Relação gel/espaco, relação água/cimento (w/c) e grau de hidratação (α)
Balshin	1949	Porosidade (p)
Price	1951	Superfície específica e temperatura
Ryshkewitch	1953	Porosidade (p)
Rastrup	1954	Maturidade e tempo equivalente (t_e)
Klieger	1958	Temperatura (t)
Rüsch	1960	Carga elevada de longa duração ou carga mantida
Hasselmann	1962	Porosidade (p)
Petrucci	1968	Modelo de crescimento relativo
Schiller	1971	Porosidade (p)
ACI 209	1971	Modelo de crescimento relativo que leva em conta o tempo (t), o tipo de cimento e a cura do concreto
Shetty e Jain	1982	Modelo de crescimento relativo
Jerath e Kabbani	1983	Modelo de crescimento relativo em função do tempo (t)
Règles B.A.E.L	1983	Modelo de crescimento relativo em função do tempo (t)
Tango	1983	Modelo de crescimento relativo
Knudsen	1984	Grau de hidratação (α)
Helene	1987	Modelo de crescimento relativo em função do tempo (t), tipo de cimento e classe de resistência do concreto
ABNT NBR 7197	1989	Modelo de crescimento relativo em função do tempo (t)
Paulon e Monteiro	1991	Comportamento da zona de transição
CEB-FIP Model Code 1990	1993	Modelo de crescimento relativo que leva em conta o tempo (t), o tipo de cimento e a temperatura do concreto
Scrivener e Pratt	1996	Comportamento da zona de transição
ABNT NBR 6118	2003	Modelo de crescimento relativo que leva em conta o tempo (t) e o tipo de cimento
<i>fib</i> Model Code 2010	2013	Modelo de crescimento relativo que leva em conta o tempo (t), o tipo de cimento, classe de resistência e a temperatura do concreto
<i>fib</i> Model Code 2020	2023	Modelo de crescimento relativo que leva em conta o tempo (t), o tipo de cimento, idade de controle e referência, classe de resistência e a temperatura do concreto
Eurocode 2	2023	Modelo de crescimento relativo que leva em conta o tempo (t), o tipo de cimento, idade de controle e referência, classe de resistência e a temperatura do concreto

Fonte: Elaborada pelo autor.

5 MÉTODO DE INTRODUÇÃO DA SEGURANÇA NO PROJETO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

O subitem 12.4 “*Verification methods of structural performance*” do *fib* Model Code 2020 (FIB, 2023) considera que a análise de segurança de novas estruturas pode ser realizada através de um dos seguintes métodos:

- a) método informado de risco ou “*risk-informed method*”;
- b) método baseado na confiabilidade ou probabilista ou “*reliability-based method*”;
- c) método do fator parcial ou semi-probabilista ou “*partial factor method*”;
- d) método do fator de resistência global ou “*global resistance factor method*”.

Conforme registrado na introdução desta dissertação, a partir da consideração do “*partial factor method*”, um dos objetivos deste trabalho é analisar a resistência de projeto f_{cd} , conforme considerada no *fib* Model Code 2020 (no caso da atual NBR 6118:2023 seria equivalente $\sigma_c = 0,85 * \eta_c * f_{cd}$). Essa resistência do concreto à compressão para fins de projeto ou de cálculo, denominada f_{cd} , é a resistência que deve ser utilizada em projeto na avaliação de seções comprimidas de concreto, considerada mínima disponível na estrutura ao longo de sua vida útil.

Desta maneira, para melhor entendimento do assunto, inicia-se apresentando o método de introdução da segurança estrutural semi-probabilista, assim como os conceitos de resistências à compressão característica (f_{ck}) e de cálculo (f_{cd}) a ele associado.

Esse método ou procedimento é atualmente o mais utilizado no dimensionamento de estruturas de concreto na Europa, no Brasil e alguns outros países. Outro conjunto grande de nações no mundo, utilizam como base de referência o método prescrito na norma americana ACI 318-14 “*Building Code Requirements for Structural Concrete*” (ACI, 2014)¹¹⁵, que apesar de semelhante guarda algumas diferenças de procedimento.

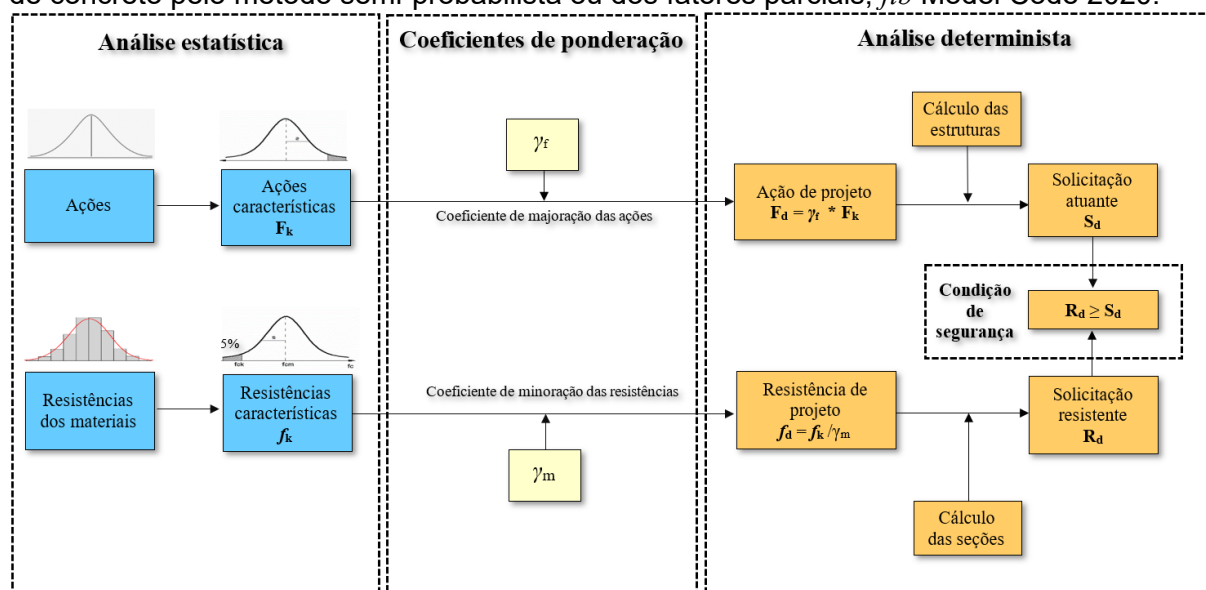
¹¹⁵ AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-14**: Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills: Aci, 2014. 520 p.

No Brasil, o método foi normatizado no ano de 1978 quando da publicação, em janeiro daquele ano, da norma ABNT NBR 6118, após seis anos de reuniões da Comissão de Estudos da ABNT, com a participação dos Engenheiros Lauro Modesto dos Santos, Augusto Carlos de Vasconcelos, Nilo Andrade do Amaral e presidida pelo Prof. Péricles Brasiliense Fusco.

O método semi-probabilista foi objeto de ampla investigação e discussão internacional promovida pelo CEB - Comité Euro-International du Béton, conforme *Bulletin D'Information n. 84* denominado “*Recommandations Internationales CEB-FIP 1970 pour le calcul et l'exécution des ouvrages en béton*”, publicado em 1972 (HELENE, 1987).

A Figura 5.1 apresenta um esquema simplificado da sequência adotada no dimensionamento de estruturas pelo método semi-probabilista, ou dos fatores parciais conforme prescrito no *fib Model Code 2020*.

Figura 5.1 – Esquema simplificado da sequência a seguir no dimensionamento de estruturas de concreto pelo método semi-probabilista ou dos fatores parciais, *fib Model Code 2020*.



Fonte: Adaptado de Helene (1980)¹¹⁶, p. 26.

O método em questão considera que tanto as resistências dos materiais como as ações são tratadas como variáveis aleatórias e estão associadas a curvas de distribuição estatística, na qual é atribuído apenas um valor característico.

¹¹⁶ HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Controle de Qualidade do Concreto**. 1980. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil Pcc/Usf, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

De acordo com Fusco (1976)¹¹⁷, a determinação da resistência característica dos diferentes materiais estruturais admite a hipótese de que as resistências tenham distribuição normal, embora também possam ser adotadas outras distribuições desde que devidamente justificadas. Por exemplo, tanto o *fib* Model Code 2010 como o *fib* Model Code 2020 consideram, além da distribuição normal, a utilização da curva de distribuição log-normal, como pode ser constatado nos subitens 4.5.2.2.3 “*Determination of partial safety factors*” e 12.5.4.2.2 “*Derivation of partial factors*”, respectivamente.

Em geral os valores, chamados característicos, correspondem ao quantil inferior de 5%, e este é o conceito que define f_{ck} para o concreto e f_{sk} para o aço.

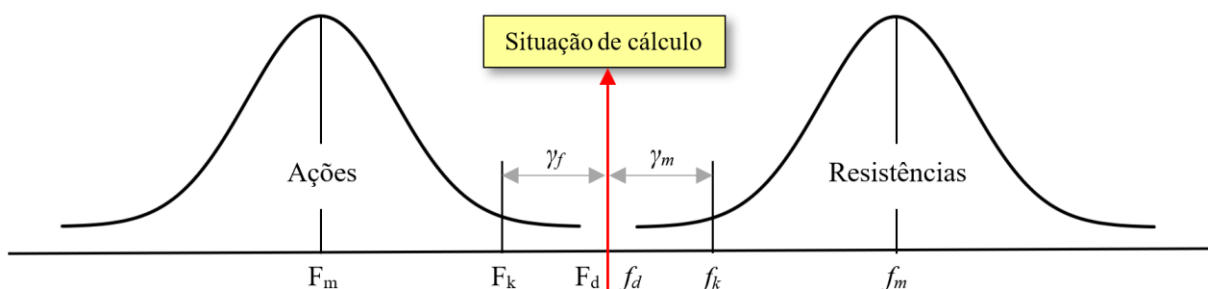
No que se refere às ações características, o mesmo autor entende que o valor seja referido ao quantil superior de 5% da distribuição correspondente, embora para as ações já não se possa especificar uma única lei de distribuição estatística.

Sendo assim, a cada uma das curvas correspondentes (ações e resistências), realiza-se uma análise estatística na qual é atribuído um valor característico para as ações (F_k) e um valor característico para as resistências dos materiais (f_k), como indicado na Figura 5.1.

Na sequência, aos valores característicos das ações (F_k) e das resistências (f_k), são aplicados coeficientes de ponderação distintos, são eles: o coeficiente de majoração das ações características (γ_f), muitas vezes chamado de coeficiente de segurança e o coeficiente de minoração das resistências características dos materiais (γ_m) que possuem por objetivo cobrir todas as incertezas ainda não tratadas por via estatística. Ou seja, por um lado são majoradas as ações ($F_d = \gamma_f * F_k$, onde γ_f é maior ou igual a 1), e por outro são minoradas as resistências ($f_d = f_k/\gamma_m$, onde γ_m é maior ou igual a 1), obtendo-se a situação de cálculo para o dimensionamento de estruturas, como ilustrado simplificadaamente na Figura 5.2.

¹¹⁷ FUSCO, Péricles Brasiliense. **Estruturas de Concreto**: fundamentos do projeto estrutural. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1976. 298 p.

Figura 5.2 – Representação simplificada dos valores das ações e das resistências, valores médios (F_m e f_m), característicos (F_k e f_k) e de projeto (F_d e f_d).



Fonte: Cheung, Beck, Stucchi, Nóbrega e Santos (2022)¹¹⁸, p. 243.

Registra-se que na norma ACI 318-14 (ACI, 2014) os coeficientes γ_m são denominados coeficientes redutores da resistência (ϕ) e ao invés de dividirem, multiplicam o valor característico porém, neste caso, sempre com $\phi < 1$, conforme detalhado no Capítulo 21 “*Strength Reduction Factors*” da referida norma americana.

Por fim, através de uma análise determinista tradicional de mecânica das estruturas, realizada mediante a comparação entre as solicitações atuante (S_d) e resistente (R_d), verifica-se a condição de segurança ($R_d \geq S_d$), no que tange as solicitações atuantes versus resistentes em cada uma das secções mais solicitadas.

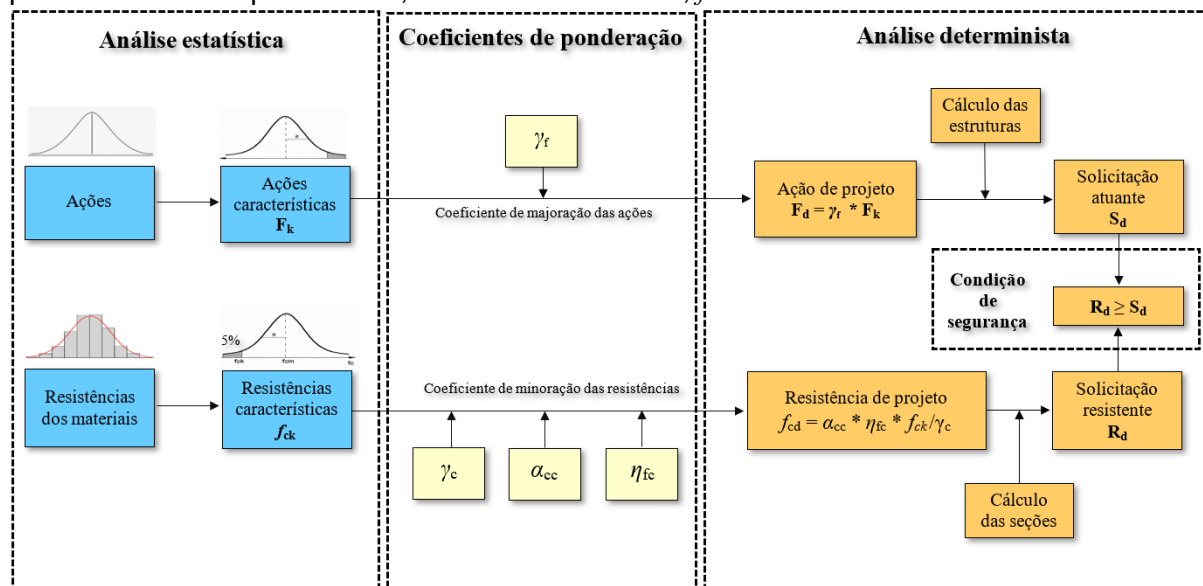
Até aqui os conceitos de resistências média (f_m), característica (f_k) e de cálculo (f_d), assim como o coeficiente de minoração (γ_m) aplicados na análise se estendem a todos os materiais que compõem a estrutura de concreto, ou seja o aço e o concreto. Sendo assim, com o objetivo de estudar o cálculo da resistência de projeto (f_{cd}), apresenta-se a seguir o modelo simplificado de introdução de segurança semi-probabilista com ênfase na análise do concreto, pois este, diferente do aço, varia suas propriedades ao longo dos anos.

Desta maneira, na Figura 5.3 são detalhados os coeficientes parciais de minoração da resistência à compressão do concreto (γ_c), a resistência característica à compressão (f_{ck}), resistência média (f_{cm}), resistência de cálculo (f_{cd}), o coeficiente que leva em consideração o efeito combinado do crescimento e decréscimo devido a

¹¹⁸ CHEUNG, Andrés Batista; BECK, André Teófilo; STUCCHI, Fernando Rebouças; NÓBREGA, Petrus Gorgônio Bulhões da; SANTOS, Sergio Hampshire de Carvalho. Ações e Segurança. In: KIMURA, Alio Ernesto; PARSEKIAN, Guilherme Aris; ALMEIDA, Luiz Carlos de; SANTOS, Sergio Hampshire de Carvalho; BITTENCOURT, Túlio Nogueira (ed.). **Estruturas de Concreto Armado**: volume 1. São Paulo: Ibracon/Abece, 2022. Cap. 4. p. 231-299.

carga mantida (α_{cc}) e o coeficiente de fragilidade (η_{fc})¹¹⁹, este último recém introduzido no texto do *fib* Model Code 2020 e adotado pelas normas ABNT NBR 6118:2023 e Eurocode 2:2023.

Figura 5.3 – Esquema simplificado da sequência a seguir no dimensionamento de estruturas pelo método semi-probabilista, focando no concreto, *fib* Model Code 2020.



Fonte: Elaborada pelo autor com base em Helene (1987), p.66.

A definição de resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) é admitida como sendo o valor que tem apenas 5% de probabilidade de não ser atingido, quando analisado um determinado lote do material, ou seja, 95% do volume daquele lote deve ter resistência superior ao f_{ck} . Matematicamente, o valor da resistência característica (f_{ck}) de um lote pode ser definido em função da resistência média do concreto (f_{cm}) e do desvio-padrão (s_d) da produção de concreto que contempla a variabilidade da operação de produção propriamente dita e a variabilidade dos procedimentos de ensaio.

Para tanto, considerando uma distribuição normal dos resultados de resistências obtidos, tem-se no Brasil, segundo a ABNT NBR 12655:2022 (ABNT, 2022)¹²⁰:

¹¹⁹ Na ABNT NBR 6118:2023 “Projeto de estruturas de concreto” (ABNT, 2023) o coeficiente de fragilidade “ η_{fc} ” é representado por “ η_c ”, conforme apresentado no subitem 8.2.10.1 “Compressão” da referida norma nacional atualmente em vigor.

¹²⁰ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: Abnt, 2022. 22 p.

$$f_{cm} = f_{ck} + 1,65 * s_d \quad (5.1)$$

Onde:

f_{ck} : resistência à compressão característica do concreto, em MPa;

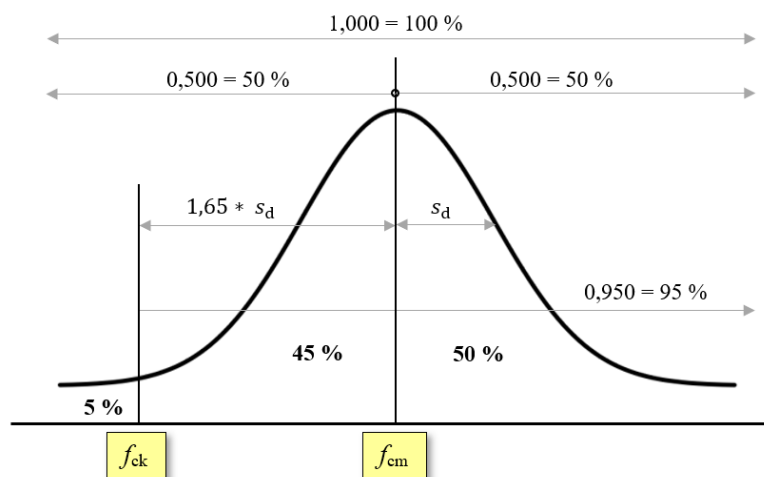
f_{cm} : resistência à compressão média do concreto, em MPa;

s_d : desvio-padrão das resistências à compressão do concreto, em MPa;

$1,65 * s_d$: pode ser obtido em tabela da normal reduzida padronizada, para o quantil inferior de 5%. Admitindo $s_d = 4$ MPa, obtém-se: $f_{cm} = f_{ck} + 6,6$, em MPa.

A Figura 5.4 apresenta graficamente os conceitos de f_{cm} e f_{ck} associados a uma curva de distribuição normal, ou função de erro, também conhecida por curva de Gauss, definida por uma função de densidade de probabilidade.

Figura 5.4 – Curva de distribuição normal f_{cm} e f_{ck} .



Fonte: Elaborada pelo autor.

No subitem 14.6.1 “*Compressive strength*” do *fib* Model Code 2020, quando não se dispõem de resultados de ensaios, e exclusivamente para fins de dosagem inicial, o f_{cm} é calculado como $f_{cm} = f_{ck} + 8$, em MPa, ou seja, admite que a variabilidade total da produção e ensaio do concreto, qualquer que seja o f_{ck} , é de $s_d = 8 / 1,65 = 4,8$ MPa. Em outras palavras considera concretos com variabilidade superior ao $s_d = 4$ MPa da ABNT NBR 12655:2022 para produção rigorosa do concreto em Centrais. Na prática prescreve uma resistência média de dosagem mais conservadora em relação às normas brasileiras.

Observa-se, no entanto, que o conceito de controle de aceitação ou de rejeição da resistência do concreto aferida por corpos de prova padrão moldados ($f_{ck,est}$), não envolve nem depende de f_{cm} . Para tal, no Brasil, utiliza-se estimadores independentes ou o próprio conceito de f_{ck} tomando o valor inferior correspondente a 5%, conforme detalhado no item 6 “*Ensaaios de controle de recebimento e aceitação*” da norma ABNT NBR 12655:2022 “*Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento*” (ABNT, 2022).

Já os critérios de aceitação preconizados pelas normas americana (ACI 318) e europeia (EN 206) são um pouco distintos, pois prescrevem que este seja realizado por meio da média móvel dos resultados e pelo controle da produção, respectivamente, apesar de sempre estar implícito, em todos os casos, o conceito probabilista do quantil de 5% (BONI; BRITEZ; HELENE, 2018)¹²¹.

5.1 Resistência de cálculo (f_{cd}) e coeficiente de ponderação (γ_c)

Para a determinação da resistência de cálculo ou de projeto do concreto (f_{cd}), considera-se que a resistência característica (f_{ck}), deve ser minorada por coeficientes de ponderação ou de redução (γ_c) dessas resistências potenciais.

No caso brasileiro, conforme subitem 5.2.3.1 “*Resistência de Cálculo*” da norma ABNT NBR 8681:2003 “*Ações e segurança nas estruturas*” (ABNT, 2003b)¹²², o coeficiente de minoração γ_c é resultante do produto de 3 coeficientes parciais a saber:

$$\gamma_c = \gamma_{c1} * \gamma_{c2} * \gamma_{c3} \quad (5.2)$$

Onde:

γ_{c1} : leva em conta a variabilidade da resistência efetiva, transformando a resistência característica num valor extremo de menor probabilidade de ocorrência;

¹²¹ BONI, Ricardo; BRITEZ, Carlos; HELENE, Paulo. Controle da resistência à compressão do concreto: análise comparativa entre os procedimentos propostos pela abnt, aci e en. estudo de caso. **Revista Alconpat**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 333-346, 31 ago. 2018. Alconpat Internacional. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.303>.

¹²² ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro: Abnt, 2003b. 18 p.

γ_{c2} : considera as diferenças entre a resistência efetiva do material da estrutura e a resistência medida convencionalmente em corpos de prova padronizados;
 γ_{c3} : considera as incertezas existentes na determinação das solicitações resistentes, seja em decorrência dos métodos construtivos seja em virtude do método do cálculo empregado.

Dessa maneira, a ABNT NBR 6118:2023, em seu subitem 12.4.1 “*Coeficientes de ponderação das resistências no estado limite último (ELU)*” estabelece para combinações normais um coeficiente $\gamma_c = 1,4$. Logo, à luz da norma brasileira, a resistência de projeto f_{cd} é calculada a partir de:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{f_{ck}}{\gamma_{c1} * \gamma_{c2} * \gamma_{c3}} = \frac{f_{ck}}{1,2 * 1,08 * 1,08} = \frac{f_{ck}}{1,4} \quad (5.3)$$

Registra-se que os valores dos coeficientes parciais de minoração, são eles: $\gamma_{c1} = 1,2$; $\gamma_{c2} = 1,08$ e $\gamma_{c3} = 1,08$ estão mencionados em artigo técnico denominado “*Controle da resistência do concreto*” publicado pelo Eng. Péricles Brasiliense Fusco em revista da ABECE, no início do ano de 2012 (FUSCO, 2012)¹²³.

O *fib* Model Code for Concrete Structures 2020 em seu subitem 12.5.4.1.4 “*Design values of basic variables*” e a EN 1992-1-1:2023 “*Eurocode 2 – Design of concrete structures*” em seu subitem 4.3.3 “*Partial factors for materials*” prescrevem, para combinações normais, o valor $\gamma_c = 1,5$.

O valor do coeficiente de ponderação adotado pelo código de norma europeu ($\gamma_c = 1,5$) é determinado conforme descrito no subitem 4.5.2.2.3 “*Determination of partial safety factors*” do *fib* Model Code 2010 que também considera a multiplicação de 3 fatores parciais, neste caso:

$$\gamma_c = \gamma_{c1} * \gamma_{Rd1} * \gamma_{Rd2} = 1,39 * 1,05 * 1,05 = 1,5$$

Onde, no caso do código de norma europeu:

γ_{c1} : fator parcial de segurança que leva em conta a variabilidade da resistência efetiva do concreto na estrutura, que é sempre maior que a variabilidade da

¹²³ FUSCO, Péricles Brasiliense. Controle da resistência do Concreto. **Abece Informa**, São Paulo, v. 16, n. 89, p. 12-19, jan. 2012. Bimestral.

resistência “potencial” do concreto na sua produção de origem, avaliada através de corpos de prova moldados;

γ_{Rd1} : fator parcial de segurança relacionado com as propriedades do material;

γ_{Rd2} : fator parcial de segurança relacionado com as incertezas geométricas.

Couto, Carvalho, Cintra e Helene (2015)¹²⁴ ao estudarem a segurança no projeto de estruturas de concreto, apresentam interessante abordagem para análise dos coeficientes parciais de segurança, inclusive comparando as premissas adotadas pela norma nacional e pela norma europeia. No referido trabalho, os autores registram que o produto dos coeficientes parciais pode variar de $1,3 \leq \gamma_c \leq 1,6$.

As resistências do concreto obtidas através de corpos de prova padrão e consideradas na determinação da resistência de projeto pelas normas brasileira e europeia, pressupõem como ponto de partida a resistência potencial máxima do concreto, pois são obtidas através de condições ideais: amostragem padronizada na boca da betoneira, moldagem e adensamento máximos perfeitos, cura com umidade e temperatura ideais, geometria favorável de um cilindro pequeno, carga centrada axial crescente e monotônica, carregamento rápido e com velocidade controlada, enfim, condições ideais para o desenvolvimento máximo e potencial da resistência do concreto na idade ensaiada.

Por outro lado, as resistências reais (ou efetivas) do concreto aplicado na estrutura são menores que as resistências potenciais obtidas na ruptura de corpos de prova entre outras razões porque: as geometrias das peças são diferentes da ideal de um cilindro, a moldagem e adensamento não conseguem ser rigorosas, o concreto está sujeito a uma cura imperfeita em geral à intempérie com umidade e temperatura variáveis, as cargas são excêntricas, cíclicas, variáveis e muitas vezes permanentes ou de longa duração, enfim as resistências médias em obra serão sempre menores que as dos corpos de prova padrão.

É conhecido o fato tecnológico de que, uma vez os materiais amassados numa betoneira, a resistência potencial daquele concreto está definida e qualquer operação diferente da ideal estabelecida nos métodos de moldagem, cura e ensaio de corpos

¹²⁴ COUTO, D.; CARVALHO, M.; CINTRA, A.; HELENE, P.. Concrete structures. Contribution to the safety assessment of existing structures. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 365-389, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952015000300007>.

de prova padrão, ou seja, qualquer erro, irá reduzir a resistência, nunca aumentá-la, a não ser quando adotadas atitudes intencionais, modificando deliberadamente a velocidade de aplicação de carga da prensa ou secando previamente o corpo de prova, antes de rompê-lo na idade especificada.

Sobre este assunto, Cremonini (1994)¹²⁵ realizou um importante estudo onde determinou a relação entre a resistência média obtida de corpos de prova padrão (resistência potencial) e a resistência média obtida de testemunhos extraídos de peças estruturais moldadas com aquele concreto (resistência efetiva), ensaiando ambos, corpo de prova e testemunho cilíndricos, de mesmas dimensões e geometria, na mesma idade, na mesma prensa com a mesma equipe de laboratoristas, encontrando a seguinte relação média:

$$\varphi = \frac{\text{média dos corpos de prova}}{\text{média dos testemunhos}} = \frac{f_{cm}}{f_{cm,ef}} = 1,24 \quad (5.4)$$

Onde:

f_{cm} : resistência à compressão média potencial, obtida em ensaios de corpos de prova moldados;

$f_{cm,ef}$: resistência à compressão média real ou efetiva, obtida em ensaios de testemunhos extraídos da estrutura.

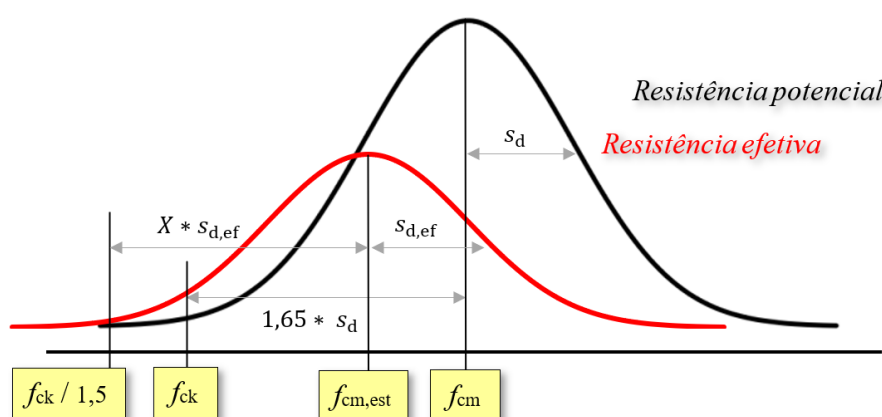
φ : razão $\frac{f_{cm}}{f_{cm,ef}} = 1,24$. Nota-se que φ está conceitualmente relacionado com fator parcial de segurança γ_{c1} do *fib* Model Code 2020, na medida que, além da maior variabilidade das resistências efetivas, esta assume valores menores que as resistências potenciais.

Isso significa dizer que a curva normal de distribuição das resistências potenciais apresentada na Figura 5.4, se desloca para a esquerda, sendo então denominada curva de resistências efetivas. Além disso, é de se esperar que a variabilidade das resistências do concreto na obra (resistência efetiva) seja maior que a variabilidade das resistências dos corpos de prova padrão moldados (resistência potencial).

¹²⁵ CREMONINI, Ruy Alberto. **Análise de estruturas acabadas**: contribuição para a determinação da relação entre as resistências potencial e efetiva do concreto. 1994. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil da Epusp, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

A Figura 5.5 apresenta graficamente a situação descrita nos parágrafos anteriores, considerando $\phi = 1,24$ e maior variabilidade das resistências efetivas em relação as potenciais ($s_{d,ef} > s_d$).

Figura 5.5 – Curva de distribuição normal para resistências potencial e efetiva, considerando coeficiente de ponderação proposto pelo *fib* Model Code 2020.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Sendo assim, através de uma visão matemática, na qual seja admitido: $f_{cm} = 1,24 * f_{cm,ef}$ (CREMONINI, 1994), coeficiente de ponderação igual a $\gamma_c = 1,5$ (FIB, 2023) e que o desvio padrão do concreto obtido em ensaios de ruptura de corpos de prova moldados na boca da betoneira (s_d) seja menor que o desvio padrão do mesmo concreto aplicado em obra ($s_{d,ef}$), este último obtido em ensaios de ruptura de testemunhos de concreto extraídos, a partir da Figura 5.5, apresenta-se as seguintes equações:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,65 * s_d \quad (5.5)$$

$$\frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{f_{ck}}{1,5} = f_{cm,ef} - X * s_{d,ef} \quad (5.6)$$

Ainda, admitindo coeficientes de variação das resistências potenciais de controle de corpos de prova moldados de $s_d/f_{cm} = 11\%$ (HELENE; TERZIAN, 1992) e para as resistências efetivas de obra igual a $s_{d,ef}/f_{cm,ef} = 15\%$ (FIB, 2013), ou seja, $s_{d,ef} = 1,1 * s_d$, torna-se possível encontrar o valor de “X” evidenciado na Figura 5.5 que, neste caso, seria igual a 2,15. Isto significa dizer que a resistência de cálculo do concreto ($f_{ck} / \gamma_c = f_{ck} / 1,5$) está efetivamente associada a um quantil inferior de aproximadamente 1,6%.

Portanto, com base no que foi apresentado neste subitem, o coeficiente de ponderação γ_c passa a ter o papel de cobrir os seguintes desconhecimentos:

- a) diferenças de adensamento, cura, temperatura e UR entre corpos de prova moldados (resistência potencial) e testemunhos extraídos da obra (resistência efetiva);
- b) variabilidade da geometria efetiva das peças entre o projetado e o construído (tolerâncias construtivas);
- c) simplificações dos modelos de cálculo;
- d) variabilidades do posicionamento das barras e dos cobrimentos de concreto, e outras de menor importância.

5.2 Coeficiente redutor da resistência de cálculo do concreto (α_{cc})

A resistência do concreto pode ser reduzida com a idade devido ao efeito das cargas mantidas de longa duração. Portanto, para a determinação da resistência de cálculo (f_{cd}), além do coeficiente de ponderação (γ_c), deve-se ainda considerar as diferenças de carregamento entre o “ideal” padronizado nos métodos de ensaio que fixam um intervalo de velocidade de carregamento e o efetivo das obras.

Nas obras, no carregamento efetivo, considera-se os efeitos das cargas elevadas de longa duração, ou carga mantida, ou efeito Rüschi, criando um coeficiente de ajuste e de minoração da resistência do concreto, denominado $\beta_{c,sus}(t, t_0)$. Despreza-se aqui o caso de carregamentos cíclicos, deixando-se essas considerações para casos específicos tais como viadutos e pontes ferroviárias, por exemplo.

Por outro lado, a resistência do concreto aumenta com a idade devido à hidratação lenta e continua dos grãos de cimento. Esse crescimento, observado durante toda sua vida útil, em geral de mais de 50 anos, vai requerer outro coeficiente de ajuste, denominado $\beta_{cc}(t)$, neste caso de majoração da resistência.

O *fib* Model Code 2020 em seu subitem 14.19.1.4 “*Design compressive and tensile strengths*”, resolve esta questão introduzindo um novo coeficiente de minoração denominado de α_{cc} que, teoricamente, combina os dois fenômenos, crescimento e decréscimo relativos da resistência:

$$\alpha_{cc} = \beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0) \quad (5.7)$$

Desta maneira, obviamente o coeficiente α_{cc} deveria depender, no mínimo do tipo e natureza do cimento, da idade de aplicação da carga elevada e das condições ambientais de exposição das peças estruturais. Este coeficiente deveria ser variável ao longo da idade pois o grau de hidratação vai variar diariamente e a relaxação do concreto vai depender do momento de aplicação efetiva das cargas de longa duração. Ainda não é assim, o *fib* Model Code 2020 considera que para situações normais de projeto, pode-se assumir que o aumento da resistência à compressão após 28 dias compensa o efeito da redução da resistência devido à carga mantida, de modo que, para novas estruturas: $\alpha_{cc} = 1$.

No caso brasileiro, conforme a norma ABNT NBR 6118:2023, em seu Capítulo 8 “*Propriedade dos materiais*”, esse coeficiente α_{cc} é substituído por um valor numérico fixo e igual a 0,85, porém tem o mesmo conceito do α_{cc} . Fusco (2008) considera que esse coeficiente redutor, por ele chamado de coeficiente modificador ou ainda coeficiente de modificação (k_{mod}) é composto pelo produto de três coeficientes parciais a saber:

$$k_{mod} = k_{mod,1} * k_{mod,2} * k_{mod,3} \quad (5.8)$$

Onde:

$k_{mod,1}$: coeficiente de modificação que considera o erro sistemático decorrente do emprego de corpos de prova de pequenas dimensões. $k_{mod,1} = 0,95$.

$k_{mod,2}$: coeficiente de modificação que considera o aumento da resistência do concreto com o passar do tempo, relativo à resistência do material no ato do ensaio de controle. $k_{mod,2} = 1,2$.

$k_{mod,3}$: coeficiente de modificação que considera a redução ou relaxamento da resistência do material da estrutura pela ação de cargas de longa duração.

$k_{mod,3} = 0,75$.

Que resulta:

$$k_{mod} = k_{mod,1} * k_{mod,2} * k_{mod,3} = 0,95 * 1,2 * 0,75 = 0,85$$

Segundo Fusco e Onish (2017)¹²⁶, o coeficiente redutor de resistência k_{mod} não é um coeficiente de segurança e não tem uma conceituação probabilista. Trata-se de um coeficiente empírico adotado para a correção do modelo de cálculo, devido as incertezas existentes no comportamento isolado de diferentes variáveis.

Para a determinação dos valores dos coeficientes médios supracitados, Fusco (2008) se baseou nas considerações e ensaios realizados por Rüschi (1960). Entretanto, convém registrar que Helene (1993) em trabalho publicado em seminário na Escola Politécnica da USP questiona as premissas adotadas por Fusco para justificar o valor de $k_{\text{mod}} = 0,85$, uma vez que entende que o coeficiente k_{mod} deve ser obtido por meio do produto das funções de crescimento e decréscimo da resistência do concreto ao longo do tempo e, portanto, não deve ser representado por um valor fixo, único e imutável.

Santos (1977)¹²⁷ entende que, em certas condições, a redução oferecida pelo coeficiente 0,85 é um pouco exagerada, uma vez que nem todas as cargas são aplicadas aos 28 dias.

Com o intuito de se aprofundar no estudo do coeficiente redutor da resistência e do seu valor adotado na ABNT NBR 6118:2023 ($k_{\text{mod}} = 0,85$), apresentam-se adiante algumas considerações que visam fomentar a discussão acerca do assunto. Para tanto, inicia-se com a análise do coeficiente de modificação parcial que considera a relaxação da resistência do material da estrutura pela ação de cargas de longa duração ($k_{\text{mod},3}$).

Fusco (2008) entende que, se deve adotar um valor de 0,75 para este coeficiente parcial ($k_{\text{mod},3} = 0,75$). De acordo com o pesquisador, este valor foi definido com base em ensaios realizados por Rüschi (1960), que estabeleceu uma relação entre resistências obtidas em ensaios lentos e ensaios rápidos correspondentes (razão: $f_{cc,t}/f_{c,t}$), com ambas as rupturas ocorrendo na mesma idade ($t = t_0 + \Delta t$), como detalhado na Figura 5.6 que apresenta uma curva média com base em resultados que não dependem da qualidade do concreto, mas consideram diferentes datas de aplicação da carga mantida ($20 \text{ dias} \leq t_0 \leq 448 \text{ dias}$).

¹²⁶ FUSCO, Péricles Brasiliense; ONISHI, Minoru. **Introdução à engenharia de estruturas de concreto**. São Paulo: Cengage, 2017. 264 p.

¹²⁷ SANTOS, Lauro Modesto dos. **Cálculo de Concreto Armado**: segundo a nb-1/76 e o ceb/72. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 409 p. Volume 1.

Figura 5.6 – Relação entre resistências obtidas em ensaios lentos e rápidos ($f_{cc,t}/f_{c,t}$) em função do tempo (Δt) após o início do carregamento (t_0).

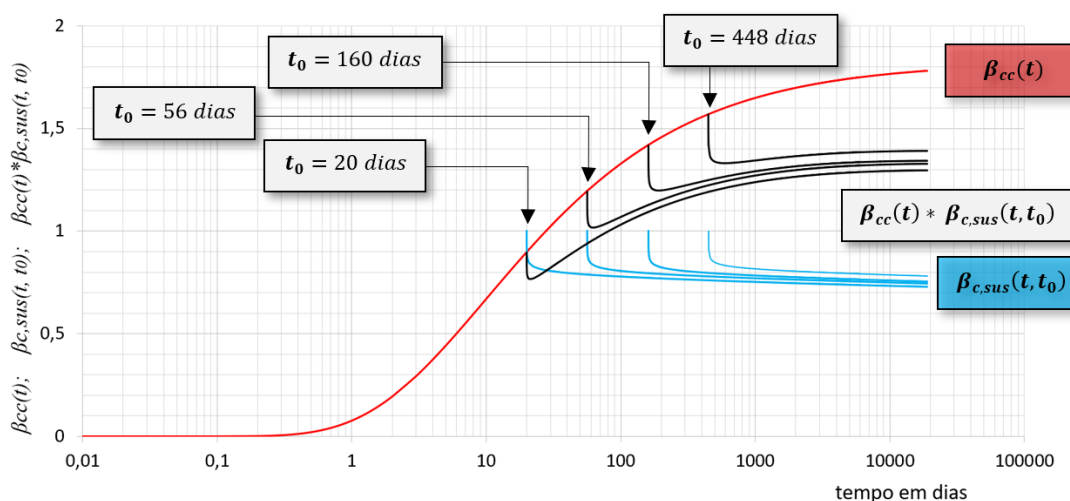


Fonte: Fusco (2008), p. 131.

Com base nos resultados obtidos, de acordo com Fusco (2008) pode-se admitir um valor limite de 0,8 (para $\Delta t = 1$ ano) e com praticamente todos os valores acima de 0,75, que é o limite considerado como efetivo no estabelecimento do coeficiente parcial $k_{mod,3}$.

Ainda, com base no que foi apresentado no subitem 4.12 “Modelo da influência da carga mantida” desta dissertação é possível entender melhor os conceitos associados ao coeficiente parcial $k_{mod,3}$. Apresenta-se na Figura 5.7 as curvas de crescimento e decréscimo de resistência (bem como seus efeitos combinados) associada ao modelo proposto pelo *fib* Model Code 2020 e considerando as datas de aplicação de cargas indicadas na figura anterior (20, 56, 160 e 448 dias).

Figura 5.7 – Curvas de crescimento e decréscimo relativos da resistência à compressão do concreto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se que a premissa adotada por Fusco (2008) para determinação do coeficiente parcial ($k_{\text{mod},3} = f_{\text{cc},t}/f_{\text{c},t}$) corresponde a:

$$k_{\text{mod},3} = \frac{\beta_{\text{cc}}(t) * \beta_{\text{c},\text{sus}}(t, t_0)}{\beta_{\text{cc}}(t)} = \beta_{\text{c},\text{sus}}(t, t_0) \quad (5.9)$$

Logo, $k_{\text{mod},3}$ não pode ser entendido como um valor fixo, pois é função do tempo (t) e da data de aplicação da carga (t_0). Helene (1993) realizou uma análise semelhante a esta. Entretanto, na época, empregando o modelo proposto pelo CEB-FIP Model Code 1990 (CEB, 1993). Neste caso o valor de $k_{\text{mod},3}$ era variável e convergia para valor de 0,727 ($\sim 0,73$) em idades avançadas, independentemente da idade de aplicação da carga.

No que se refere ao coeficiente de modificação que considera o aumento da resistência do concreto com o passar do tempo ($k_{\text{mod},2}$), Fusco (2012) admite que este é sempre igual a 1,2, o que não corresponde à realidade. Ou seja, este valor considera que há um crescimento relativo da resistência aos 28 dias fixo, que é de 20%, independentemente do tipo de cimento utilizado.

A análise deste coeficiente parcial ($k_{\text{mod},2}$) deixa bem claro que este está associado ao coeficiente $\beta_{\text{cc}}(t)$ proposto pelo *fib* Model Code 2020. Sendo assim, como pode ser observado na Figura 4.14, o crescimento da resistência em relação a idade de 28 dias varia entre 1,10 e 1,78, a depender do coeficiente de crescimento s_c considerado.

Sobre o coeficiente de modificação parcial que considera o erro sistemático do emprego de corpos de prova de pequenas dimensões ($k_{\text{mod},1}$), com bases em ensaios realizados por F. R. Jaeger, em 1941, Fusco (2008) admite que $k_{\text{mod},1} = 0,95$. O autor desta dissertação entende que este coeficiente parcial ($k_{\text{mod},1}$) deve ser considerado quando da análise coeficiente de ponderação γ_c , conforme detalhado no subitem 5.1 “Resistência de cálculo (f_{cd}) e coeficiente de ponderação (γ_c)” desta dissertação.

Portanto, parece ser mais racional e preciso analisar o valor do coeficiente redutor da resistência de cálculo, α_{cc} , como sendo o produto das expressões que representam o crescimento e o decréscimo da resistência, variável de acordo com as características do concreto utilizado, idade de controle e referência e data de aplicação da carga mantida.

5.3 Coeficiente de fragilidade do concreto (η_{fc})

Recentemente, para a determinação da resistência de projeto f_{cd} , as normas ABNT NBR 6118:2023 (ABNT, 2023) e Eurocode 2 (CEN, 2023), assim como o *fib* Model Code 2020 (FIB, 2023) introduziram um coeficiente de fragilidade do concreto (η_{fc}), também conhecido por “*concrete brittleness factor*”. Trata-se de um coeficiente multiplicador ($\eta_{fc} \leq 1$) da resistência de projeto, para classes de resistência superiores a C40. Este coeficiente é determinado por meio da expressão:

$$\eta_{fc} = \left(\frac{40}{f_{ck}}\right)^{1/3}, \text{ para } f_{ck} > 40 \text{ MPa} \quad (5.10)$$

De acordo com o *fib* Model Code 2020 é um fator de redução da resistência de projeto em decorrência do aumento da fragilidade para concretos de maior resistência, inicialmente utilizado nos casos de cisalhamento, mas também aplicado em outros casos de compressão simples de pilares, flexo-compressão entre outros, como indicado na Equação 5.11.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * \eta_{fc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (5.11)$$

Moccia, Yu, Ruiz e Muttoni (2020)¹²⁸, pesquisadores da Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, ao estudarem a influência da fragilidade do material e da redistribuição de tensões internas, por meio de resultados de ensaios experimentais em mais de 400 pilares de concreto armado, incluindo concreto de alta resistência, também concluíram que o coeficiente de fragilidade deve ser considerado na determinação da resistência estrutural de projeto, como indicado na Equação 5.10.

Registra-se que esta dissertação não tem o objetivo de estudar este coeficiente, portanto, para fins de análise e discussão da resistência de projeto, este coeficiente será considerado igual a 1, sendo preferível, segundo este autor, controlar a menor ductilidade dos elementos estruturais de concretos do Grupo II (ABNT, 2015c)¹²⁹, por meio das deformações específicas máximas ou últimas como fazia a NBR 6118:2014.

¹²⁸ MOCCIA, Francesco; YU, Qianhui; RUIZ, Miguel Fernández; MUTTONI, Aurelio. Concrete compressive strength: from material characterization to a structural value. **Structural Concrete**, [S.L.], v. 22, n. 1, p. 1-21, 24 jul. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.202000211>.

¹²⁹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: Abnt, 2015c. 3 p.

6 ESTUDO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA DE ANÁLISE

Neste capítulo são apresentados resultados de resistência à compressão de diferentes traços de concreto produzidos no Brasil desde o final da década de 1930, bem como a metodologia de análise empregada para confrontá-los com os resultados teóricos obtidos por meio do modelo de crescimento da resistência, este último proposto pelo *fib* Model Code for Concrete Structures 2020.

Os dados de resistência à compressão aqui apresentados são oriundos de resultados de ensaios obtidos em duas fontes distintas a saber:

- a) *histórica*, referente aos dados obtidos em ensaios de resistência à compressão de estudos laboratoriais, disponíveis em literatura técnica consagrada sobre o tema;
- b) *de controle tecnológico de obras*, referente aos dados obtidos em ensaios de ruptura de corpos de prova cilíndricos de concreto disponibilizados pela empresa PhD Engenharia, desde o ano de 2013, oriundos do controle tecnológico de aceitação do concreto de obras civis nacionais.

6.1 Fontes: histórica e de controle tecnológico

A fonte histórica envolve resultados de resistências à compressão obtidos em estudos realizados por engenheiros pesquisadores brasileiros e se encontram disponíveis em artigos técnicos, dissertações e teses de doutorado, devidamente referenciadas neste trabalho. Estes resultados são aqui identificados como *dados históricos* e foram obtidos nas seguintes fontes de literatura acadêmica nacional:

- a) 1.641 resultados de resistência obtidos em artigo técnico denominado “*Estudo da previsão da resistência à compressão dos concretos*” publicado pelo Pesquisador do IPT, Eng. Epaminondas Melo do Amaral Filho na Revista Politécnica, em maio de 1945 (AMARAL FILHO, 1945). Estes dados, assim como informações acerca do estudo estão apresentados no Anexo A.
- b) 7.820 resultados de resistência obtidos na dissertação de mestrado denominada “*Contribuição ao estudo da previsão da resistência à*

compressão de cimentos e concretos”, datada de 1983, apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, de autoria do Pesquisador do IPT, Eng. Carlos Eduardo de Siqueira Tango, sob orientação da Prof.^a Dra. Yasuko Tezuka (TANGO, 1983). Estes dados estão apresentados detalhadamente no Anexo B.

- c) 2.360 resultados de resistência obtidos na tese de doutorado denominada *“Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para dosagem e controle dos concretos de cimento Portland”*, datada de 1987, apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo de autoria do Prof. Paulo Helene sob orientação do Prof. Dr. Francisco Romeu Landi (HELENE, 1987). O estudo considerou 6 diferentes tipos de cimento, oriundos das 56 diferentes fábricas de cimento existentes em território nacional na época, configurando amostras representativas de todos os cimentos nacionais. Informações adicionais e os dados referentes a este estudo estão apresentados no Anexo C.
- d) resultados de resistência à compressão de aproximadamente 580 amostras produzidas com cimentos nacionais, fabricados em plantas localizadas em todas as regiões do território brasileiro entre os anos de 2009 e 2010. Os resultados foram publicados em artigo técnico denominado *“A evolução da normalização e de algumas propriedades dos cimentos Portland brasileiros”* de autoria dos pesquisadores Geólogo Arnaldo Forti Battagin, Eng.^a Inês Laranjeira da Silva Battagin e Eng. Flávio André da Cunha Munhóz, apresentado no 52º Congresso Brasileiro do Concreto do IBRACON em outubro de 2010 (BATTAGIN; BATTAGIN; MUNHÓZ, 2010)¹³⁰. Estes dados estão apresentados no Anexo D desta dissertação.

Sendo assim, os *dados históricos* contemplam a análise de mais de 12.000 resultados de ensaios de resistência à compressão. Dada a confiabilidade das instituições envolvidas, a competência e relevância profissional dos pesquisadores

¹³⁰ BATTAGIN, Arnaldo Forti; BATTAGIN, Inês Laranjeira da Silva; MUNHÓZ, Flávio André da Cunha. A evolução da normalização e de algumas propriedades dos cimentos Portland brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, Fortaleza. **Anais do 52 CBC2018**. Fortaleza: Ibracon, 2010. p. 1-16.

responsáveis pela elaboração dos trabalhos supracitados, prevalece a insuspeição dos dados utilizados.

A segunda fonte de resultados analisados tem origem no controle tecnológico de aceitação do concreto de diversas obras nacionais, obtidos no acervo técnico da empresa PhD Engenharia, sendo que o autor desta dissertação participou de grande parte deste controle, desde fevereiro de 2013. Estes resultados serão chamados neste trabalho de *dados atuais*.

Devido a acordos e cláusulas contratuais de confidencialidade, o nome e o endereço das obras, fornecedores de concreto e laboratórios responsáveis pelos ensaios relativos aos *dados atuais* serão omitidos, sem prejuízo algum ao que se deseja apresentar.

É imperativo registrar que os *dados atuais* compilam informações de resistência à compressão de concretos controlados por laboratórios idôneos e acreditados, de acordo com as normas vigentes na época da execução, desde 2013. Os dados serão tratados separadamente, a depender das características de cada um dos traços analisados e do período de controle.

Registra-se ainda que, na maioria dos casos, os *dados atuais* são oriundos de concretos produzidos por empresas fornecedoras (centrais dosadoras de concreto) associadas à ABESC – Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem.

Os laboratórios de controle da resistência à compressão do concreto são acreditados pela RBLE - Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio do INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia e os profissionais envolvidos nos ensaios de controle de aceitação são capacitados pelo NQCP - Núcleo de Qualificação e Certificação de Pessoal do IBRACON.

Na sequência, apresenta-se um resumo dos *dados atuais*:

- a) obra localizada na cidade de São Paulo, executada entre fevereiro de 2013 e maio de 2016, denominada Obra A. Os dados referentes a esta obra contemplam 1.166 amostras de concreto classes de resistência C35, C40 e C45, produzidos com cimentos tipo CP III 40 e CP V-ARI, ensaiadas aos 7, 28 e 63 dias de idade (total de 4.662 resultados de resistência à compressão), conforme detalhado no Anexo E.

- b) obra localizada na cidade de Vitória, ES, executada entre agosto de 2017 e janeiro de 2019, denominada Obra B. Os dados referentes a esta obra contemplam 712 resultados de resistência à compressão de concretos com classe de resistência de C30, C35 e C40, todos produzidos com cimento tipo CP III e ensaiados aos 7 e 28 dias, conforme apresentado no Anexo F.
- c) obra localizada na cidade de São Paulo, executada entre setembro de 2018 e fevereiro de 2020, denominada Obra C. Os dados referentes a esta obra contemplam 1.084 resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade. Foram analisados concretos classes de resistência C30, C40 e C50, todos produzidos com cimento tipo CP II E 40, conforme apresentado no Anexo G.
- d) obra localizada no Distrito Federal, executada entre junho de 2015 e agosto de 2016, denominada Obra D. Os dados referentes a esta obra de reforço estrutural contemplam 556 resultados de resistência à compressão de um microconcreto industrializado de elevado desempenho e alta resistência inicial com classe de resistência C70. Neste caso os ensaios de ruptura foram realizados aos 3 e 28 dias de idade, como detalhado no Anexo H.

Sendo assim, os *dados atuais* envolvem, no total, a análise de mais de 7.000 resultados de ensaios de resistência à compressão de concretos de diversas classes de resistência (C30, C35, C40, C45, C50 e C70) produzidos com cimentos tipo CP II, CP III e CP V.

Portanto, nesta dissertação, considerando ambas as fontes, tem-se um banco de dados com aproximadamente 20.000 resultados de resistência à compressão para análise das curvas de crescimento da resistência. Estes dados serão analisados conforme metodologia detalhada a seguir.

6.2 Metodologia de análise das curvas de crescimento da resistência

Adota-se nesta dissertação o modelo proposto pelo *fib* Model Code for Concrete Structures 2020 (FIB, 2023), utilizado como código modelo de referência em 42 países do mundo, inclusive no Brasil. O modelo em questão é representado pela seguinte equação:

$$f_{c(t)} = \beta_{cc}(t) * f_{c(t_{ref})} \rightarrow \frac{f_{c(t)}}{f_{c(t_{ref})}} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}}\right] * \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}}\right)\right\}} \quad (2.18)$$

Onde:

$\beta_{cc}(t)$: função que representa o crescimento relativo da resistência à compressão com o tempo, adimensional;

$f_{c(t)}$: resistência à compressão na idade t , em MPa;

t_{ref} : idade de controle e referência, em dias;

$f_{c(t_{ref})}$: resistência à compressão na idade t_{ref} , em MPa;

t : idade do concreto, em dias.

s_c : coeficiente adimensional relacionado ao desenvolvimento da resistência do concreto que pode variar de 0,1 a 0,6.

Como condições de contorno, adotou-se uma idade de controle e referência igual a 28 dias, ou seja, $t_{ref} = 28$ dias e uma temperatura de 20°C. Dessa maneira a Equação 2.18 assume o seguinte formato:

$$\beta_{cc}(t) = \frac{f_{c(t)}}{f_{c(t_{ref})}} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}}\right] * \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}}\right)\right\}} \rightarrow \beta_{cc}(t) = \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right] * \left(\sqrt{\frac{28}{28}}\right)\right\}}$$

$$\beta_{cc}(t) = \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = e^{\left\{s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]\right\}} \quad (4.42)$$

A escolha desse modelo se justifica por se tratar de um modelo consagrado, atual e de referência nas normas Eurocode 2:2023 e ABNT NBR 6118:2023, largamente utilizado em projetos estruturais e mais adequado ao que se deseja apresentar, considerando o contexto desta dissertação, uma vez que serão confrontados os coeficientes s_c teóricos de crescimento com resultados reais obtidos.

Para facilitar a determinação dos coeficientes de crescimento de resistência à compressão do concreto (s_c), à luz do código modelo 2020, a partir de resultados reais de resistência, faz-se necessário que a expressão preconizada pelo *fib* Model Code 2020, nas condições de contorno mencionadas (Equação 4.42), seja transformada e apresentada em formato linear: $y = Ax + B$. Trata-se de um artifício matemático muito útil, que facilita sobremaneira as operações necessárias.

Logo, para obtenção da referida expressão linearizada, foram efetuadas algumas operações matemáticas, como detalhado adiante:

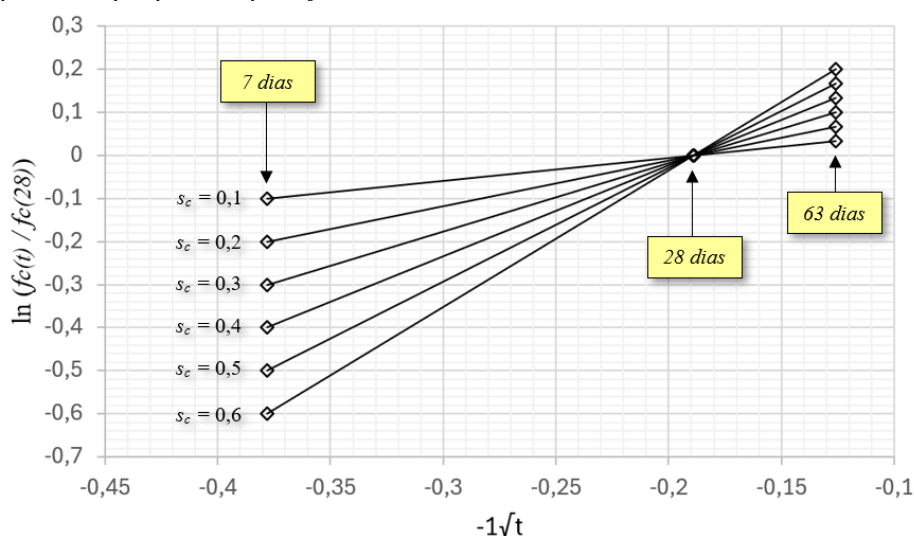
$$\frac{f_c(t)}{f_c(28)} = e^{\left\{s_c \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]\right\}} \rightarrow \ln \frac{f_c(t)}{f_c(28)} = \ln e^{\left\{s_c \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]\right\}}$$

$$\ln \frac{f_c(t)}{f_c(28)} = \sqrt{28} * s_c \left(-\frac{1}{\sqrt{t}}\right) + s_c \quad (6.1)$$

Nota-se, na expressão anterior, que ambos os coeficientes obtidos [angular ($A = \sqrt{28} * s_c$) e linear ($B = s_c$)] estão relacionados com o parâmetro de crescimento da resistência à compressão do concreto, o coeficiente s_c .

A Figura 6.1 representa graficamente a expressão linearizada, para os valores usuais recomendados pelo *fib* Model Code 2020 ($0,1 \leq s_c \leq 0,6$).

Figura 6.1 - Representação linear das curvas de crescimento da resistência à compressão propostas pelo *fib* Model Code 2020.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A idade de 28 dias está representada no eixo das abscissas pelo valor $-\frac{1}{\sqrt{28}} = -0,189$. A resistência à compressão relativa aos 28 dias de idade está indicada no eixo das ordenadas e, em todos os casos, independentemente do coeficiente s_c considerado, com valor igual a 0, pois $\ln \frac{f_c(28)}{f_c(28)} = \ln 1 = 0$.

Portanto, no caso da expressão linearizada, é intuitivo observar que a inclinação das retas varia de acordo com o parâmetro de crescimento de resistência

(s_c) e que todas as retas possuem o par ordenado (-0,189; 0) em comum, para qualquer valor do coeficiente s_c .

Sendo assim, de posse do valor do logaritmo natural da razão $\frac{f_c(t)}{f_{c(28)}}$ e da respectiva idade t é possível determinar os pares ordenados em diferentes idades, dado por: $(-\frac{1}{\sqrt{t}}; \ln \frac{f_c(t)}{f_{c(28)}})$, encontrar a reta média definida por esses pares ordenados e obter o valor de s_c , correspondente aos valores de resistência à compressão obtidos nos ensaios.

Para melhor entendimento desta metodologia, apresenta-se a título de exemplo, o tratamento dos resultados publicados por Boni, Couto e Helene (2020)¹³¹, considerando apenas uma amostra de concreto produzido com cimento tipo CP III - 40, $f_{ck} = 45$ MPa, submetido a cura úmida a temperatura de 20°C. Os resultados de resistência aos 7, 28 e 63 dias de idade utilizados neste exemplo estão indicados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Exemplo da metodologia adotada, considerando apenas uma amostra coletada de um lote produzido com cimento tipo CP III – 40, $f_{ck} = 45$ MPa.

f_{ck} (MPa)	$f_{c(t)}$ (MPa)			$\frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}}$ (adimensional)			$\ln \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}}$ (adimensional)		
	7 dias	28 dias	63 dias	7 dias	28 dias	63 dias	7 dias	28 dias	63 dias
45 (C45)	$f_{c(7)}$	$f_{c(28)}$	$f_{c(63)}$	$\frac{f_{c(7)}}{f_{c(28)}}$	$\frac{f_{c(28)}}{f_{c(28)}}$	$\frac{f_{c(63)}}{f_{c(28)}}$	$\ln \frac{f_{c(7)}}{f_{c(28)}}$	$\ln \frac{f_{c(28)}}{f_{c(28)}}$	$\ln \frac{f_{c(63)}}{f_{c(28)}}$
	37,4	52,6	59,8	0,711	1,000	1,139	- 0,341	0	0,128

Fonte: Boni, Couto e Helene (2020), p. 12.

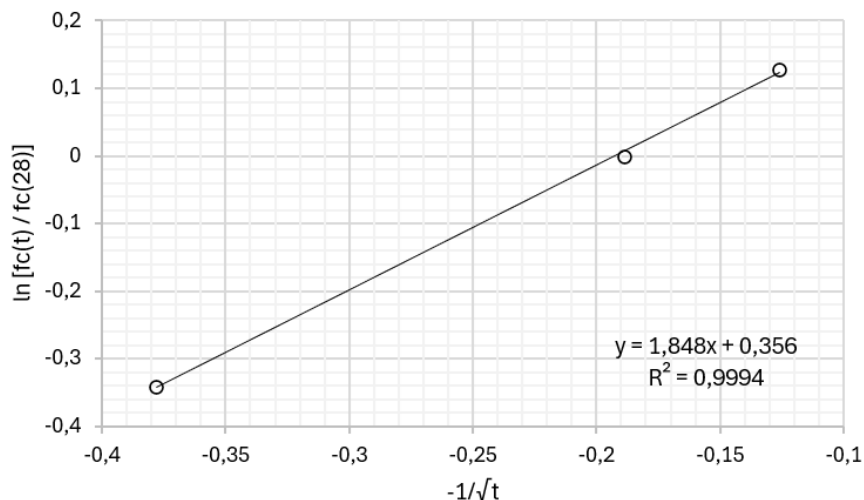
Ou seja, para o exemplo apresentado na Tabela 6.1, tem-se os seguintes 3 pares ordenados: (-0,378; -0,341), (-0,189; 0) e (-0,126; 0,128), correspondente a $(-\frac{1}{\sqrt{t}}; \ln \frac{f_c(t)}{f_{c(28)}})$, para as idades 7, 28 e 63 dias, respectivamente.

Os 3 pares ordenados mencionados no parágrafo anterior foram então lançados em um gráfico específico, obtido de acordo com a expressão linearizada do modelo proposto pelo *fib* Model Code 2020 (Equação 6.1). Em seguida, por regressão

¹³¹ BONI, Ricardo; COUTO, Douglas; HELENE, Paulo. O desenvolvimento da resistência à compressão do concreto produzidos com cimentos nacionais à luz do modelo proposto pela norma europeia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 62., 2020, Florianópolis. **Anais do 62 CBC**. Florianópolis: Ibracon, 2020. p. 1-16.

linear foi obtida a reta média e sua respectiva equação linear, conforme apresentado no gráfico da Figura 6.2.

Figura 6.2 - Exemplo da representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão da amostra apresentada na Tabela 6.1.



Fonte: Boni, Couto e Helene (2020), p. 12.

Como a equação da reta média obtida é dada por $y = 1,848x + 0,356$ e a expressão linearizada do modelo europeu é dada por $\ln \frac{f_c(t)}{f_c(28)} = \sqrt{28} * s_c \left(-\frac{1}{\sqrt{t}} \right) + s_c$, para o exemplo em questão, o parâmetro s_c pode ser obtido de duas maneiras:

- ✓ obtido diretamente por meio do coeficiente linear da equação:
 $s_c = 0,356 \rightarrow s_c \approx 0,36$;
- ✓ obtido a partir do coeficiente angular da equação:
 $\sqrt{28} * s_c = 1,848 \rightarrow s_c \approx 0,35$.

Na opinião do autor, a determinação do parâmetro s_c , por meio do coeficiente angular ($\sqrt{28} * s_c$) é mais adequada, uma vez que este é a representação da inclinação da reta, menos suscetível às pequenas variações. Apesar de que, em ambos os casos, os valores obtidos sempre são bem próximos, como não poderia deixar de ser.

Ainda, vale registrar que a equação de uma reta pode ser definida por apenas 2 pontos. Portanto, de posse de resistências em 2 diferentes idades, sendo uma delas aos 28 dias, uma vez que a expressão considera a razão $\frac{f_c(t)}{f_c(28)}$, também é possível determinar o parâmetro s_c de um traço de concreto, por meio da mesma metodologia.

Sendo assim, nota-se ainda uma maneira expedita de se obter o valor do coeficiente s_c que pode ser utilizada em casos gerais e análises preliminares. Para tanto, deve-se conhecer as resistências à compressão aos 7 e 28 dias, conforme detalhado a seguir, a partir da Equação 6.1.

$$\ln \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = \sqrt{28} * s_c \left(-\frac{1}{\sqrt{t}} \right) + s_c \rightarrow \ln \frac{f_{c(7)}}{f_{c(28)}} = \sqrt{28} * s_c \left(-\frac{1}{\sqrt{7}} \right) + s_c \rightarrow \ln \frac{f_{c(7)}}{f_{c(28)}} = -2 * s_c + s_c$$

$$s_c = -\ln \frac{f_{c(7)}}{f_{c(28)}} \quad (6.2)$$

Evidentemente que a Equação 6.2 também pode ser deduzida a partir da Equação 4.42 não linearizada do *fib* Mode Code 2020. Para tanto adotar $t = 7$, ou seja, $f_{c(t)} = f_{c(7)}$, logo:

$$\frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = e^{\left\{ s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right] \right\}} \rightarrow \frac{f_{c(7)}}{f_{c(28)}} = e^{\left\{ s_c * \left[1 - \sqrt{\frac{28}{7}} \right] \right\}} \rightarrow \frac{f_{c(7)}}{f_{c(28)}} = e^{\{-s_c\}}$$

$$\ln \frac{f_{c(7)}}{f_{c(28)}} = \ln e^{\{-s_c\}} \rightarrow \ln \frac{f_{c(7)}}{f_{c(28)}} = -s_c \ln e$$

$$s_c = -\ln \frac{f_{c(7)}}{f_{c(28)}}$$

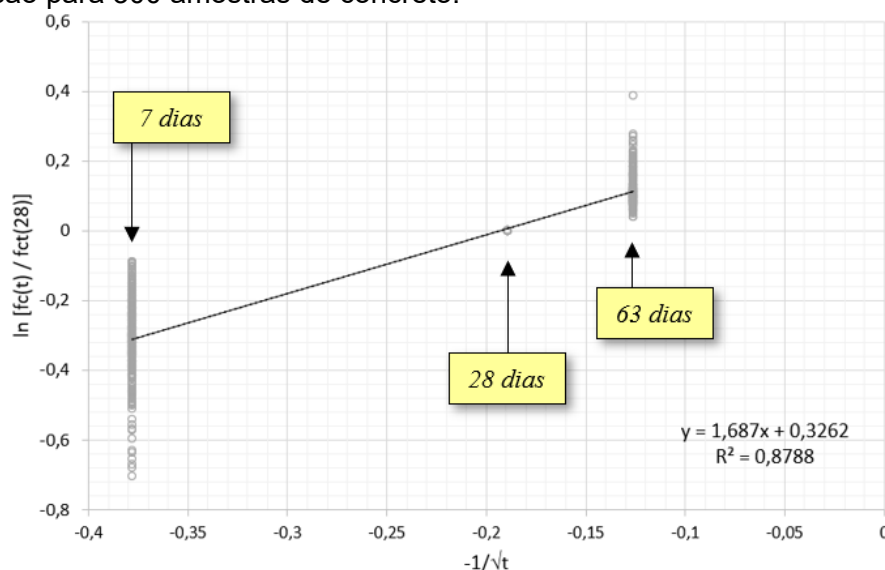
Portanto, no caso do exemplo anterior, apresentado na Tabela 6.1, tem-se:

$$s_c = -\ln \frac{f_{c(7)}}{f_{c(28)}} \rightarrow s_c = -\ln \frac{37,4}{52,6} \rightarrow s_c \approx 0,34$$

De maneira a se obter um valor para o coeficiente s_c mais representativo do traço estudado, o próximo passo envolve a análise de um número maior de amostras, considerando, evidentemente, sempre uma mesma família de traço de concreto.

O gráfico da Figura 6.3 apresenta a reta média obtida por meio da análise de 300 amostras obtidas em Boni, Couto e Helene (2020), considerando um mesmo traço de concreto com $f_{ck} = 40$ MPa, produzido com cimento tipo CP III - 40, relação $w/c = 0,45$.

Figura 6.3 - Exemplo da representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão para 300 amostras de concreto.



Fonte: Boni, Couto e Helene (2020), p. 13.

Desta maneira, torna-se possível encontrar o coeficiente s_c , que representa o desenvolvimento médio esperado da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo considerando um determinado traço de concreto, produzido com os mesmos insumos e submetido às mesmas condições de cura. Nota-se que, neste exemplo específico, o resultado obtido foi de:

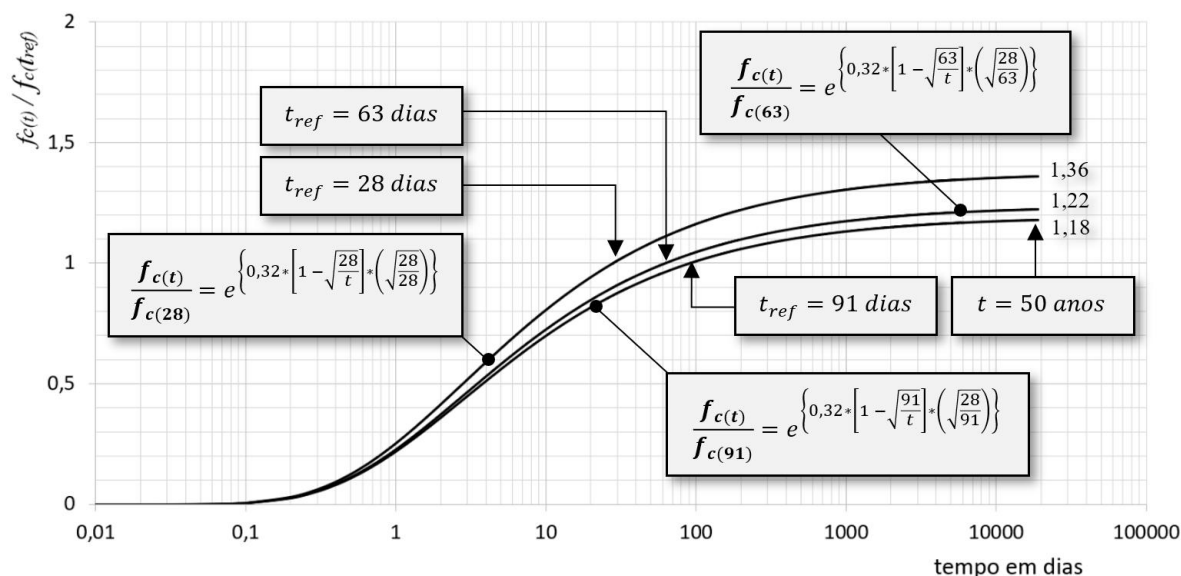
$$\sqrt{28} * s_c = 1,687 \rightarrow s_c = 0,32$$

Logo, a curva de crescimento da resistência à compressão do concreto analisado na Figura 6.3 deve ser representada pela seguinte equação:

$$f_{c(t)} = \beta_{cc}(t) * f_{c(t_{ref})} \rightarrow \frac{f_{c(t)}}{f_{c(t_{ref})}} = e^{\left\{0,32 * \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}}\right] * \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}}\right)\right\}}$$

Adotando idades de controle e referência iguais a: $t_{ref} = 28$ dias, $t_{ref} = 63$ dias e $t_{ref} = 91$ dias e uma temperatura de 20°C em todos os casos, obtém-se para o exemplo anterior as 3 diferentes curvas apresentadas na Figura 6.4.

Figura 6.4 – Curvas de crescimento relativo da resistência para o concreto $s_c = 0,32$, para $t_{ref} = 28$ dias, $t_{ref} = 63$ dias e $t_{ref} = 91$ dias.



Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante registrar que as 3 curvas apresentadas na figura anterior são equivalentes e representam o crescimento da resistência à compressão de um mesmo concreto de $s_c = 0,32$. Os diferentes desenvolvimentos de curva observados se justificam, uma vez que se trata de curvas de crescimento relativo, ou seja, adotando $t_{ref} = 28$ dias, a resistência última (≈ 50 anos) é 36% superior a resistência aos 28 dias [$f_{c(50 \text{ anos})} = 1,36 \cdot f_{c(28)}$]. Se considerado $t_{ref} = 63$ dias, a resistência última é 22% maior que a resistência aos 63 dias [$f_{c(50 \text{ anos})} = 1,22 \cdot f_{c(63)}$] e, finalmente, se considerado $t_{ref} = 91$ dias, a resistência última é 18% maior que a resistência aos 91 dias [$f_{c(50 \text{ anos})} = 1,18 \cdot f_{c(91)}$]. Entretanto, nestes 3 casos, o valor numérico da resistência última à compressão (em MPa) será exatamente o mesmo.

Ainda, de maneira a realizar a análise das curvas de crescimento de resistência à compressão à luz do atual modelo *fib* Model Code 2020 é possível, por meio de algumas operações matemáticas, representar este mesmo modelo por meio de uma equação mais elegante, que também será utilizada para análise de dados, conforme demonstrado adiante:

$$\beta_{cc}(t) = \frac{f_c(t)}{f_{c(t_{ref})}} = e^{\left\{s_c \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{t_{ref}}{t}}\right] \cdot \left(\sqrt{\frac{28}{t_{ref}}}\right)\right\}} \quad (2.18)$$

Adotando novamente como condição de contorno $t_{ref} = 28$ dias, tem-se:

$$\beta_{cc}(t) = \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = e^{\left\{s_c \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]\right\}} \quad (4.42)$$

Sendo assim, por meio de algumas operações matemáticas:

$$\beta_{cc}(t) = \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = e^{s_c} * e^{-s_c \sqrt{\frac{28}{t}}} \rightarrow \beta_{cc}(t) = \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = \frac{e^{s_c}}{e^{s_c \sqrt{28} * \frac{1}{\sqrt{t}}}}$$

Nota-se que, substituindo e^{s_c} por um coeficiente k_{11} e $e^{s_c \sqrt{28}}$ por um coeficiente k_{12} , obtém-se a mesma equação proposta há 38 anos por Helene (1987) e apresentada no Capítulo 2 desta dissertação.

$$\beta_{cc}(t) = \frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = \frac{k_{11}}{k_{12}^{1/\sqrt{t}}} \quad (2.15)$$

Dessa maneira, também torna-se possível encontrar o parâmetro s_c tendo como base a Equação 2.15, uma vez que $k_{11} = e^{s_c}$, ou ainda, $s_c = \ln k_{11}$. Nota-se ainda que existe uma relação de interdependência entre os coeficientes k_{11} e k_{12} , dada por: $k_{12} = k_{11} * \sqrt{28} \approx 5,3 * k_{11}$. A equação no formato proposto por Helene (1987), dada a vantagem de suas simplificações matemáticas, sem prejuízo conceitual em relação a equação do *fib* Model Code 2020, também será utilizada nesta dissertação na análise dos resultados (vide subitem 7.3 desta dissertação).

6.3 Metodologia de análise das curvas de decréscimo da resistência

No que se refere a expressão utilizada para representar o decréscimo da resistência devido ao efeito da carga mantida, utilizou-se como referência neste trabalho a expressão proposta pelo *fib* Model Code 2020, conforme apresentado adiante:

$$\beta_{c,sus}(t, t_0) = \beta_{t0}(t_0) + [1 - \beta_{t0}(t_0)] * \left[1 + 10^4 \frac{(t-t_0)}{t_0}\right]^{-0,1} \quad (4.50)$$

Onde:

$\beta_{c,sus}(t, t_0)$: função que representa a diminuição relativa da resistência ao longo do tempo em decorrência da carga mantida. Válida para $(t - t_0) > 0,015$ dias (≈ 20 minutos).

$\beta_{t0}(t_0)$: parâmetro que considera a maturidade do concreto, dado por:

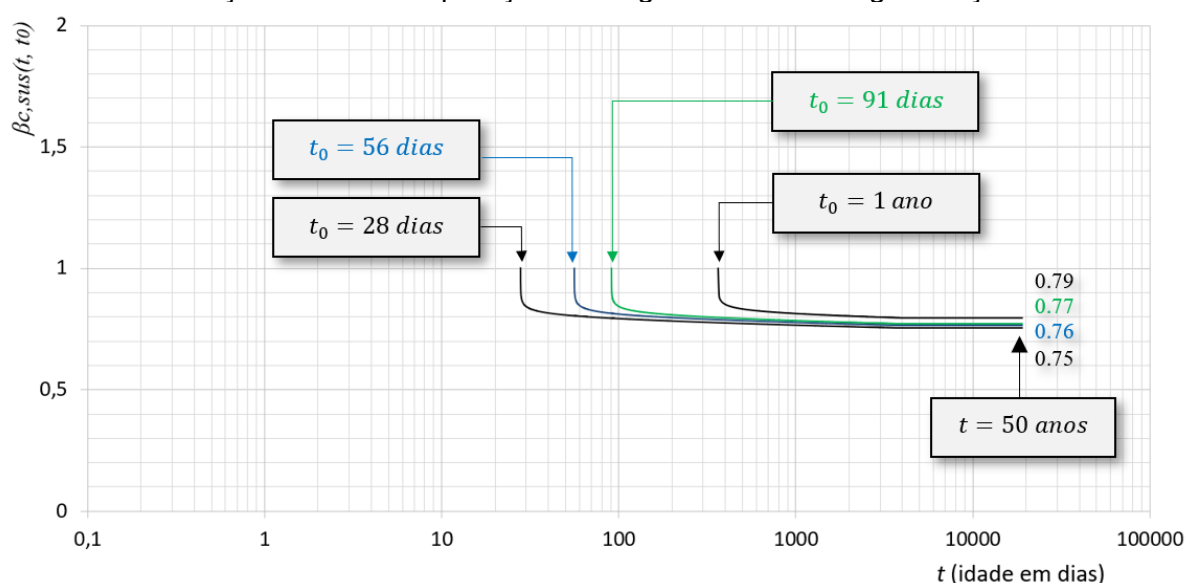
$$\beta_{t_0}(t_0) = 0,64 + 0,01 * \ln(t_0)$$

t_0 : idade de carregamento do concreto, em dias. $t_0 \geq 7$ dias.

$(t - t_0)$: tempo de carga mantida, em dias. Para $(t - t_0) > 10$ anos, adotar $(t - t_0) = 3650$ dias.

A Figura 6.5 exemplifica graficamente a função $\beta_{c,sus}(t, t_0)$, para cargas elevadas e mantidas aplicadas em diferentes idades: 28, 56, 91 e 365 dias.

Figura 6.5 – Curvas de decréscimo relativo da resistência à compressão até os 50 anos de idade em função da data de aplicação da carga elevada de longa duração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Equação 4.50 foi detalhadamente estudada no subitem 4.12 “*Modelo da influência da carga mantida*” desta dissertação.

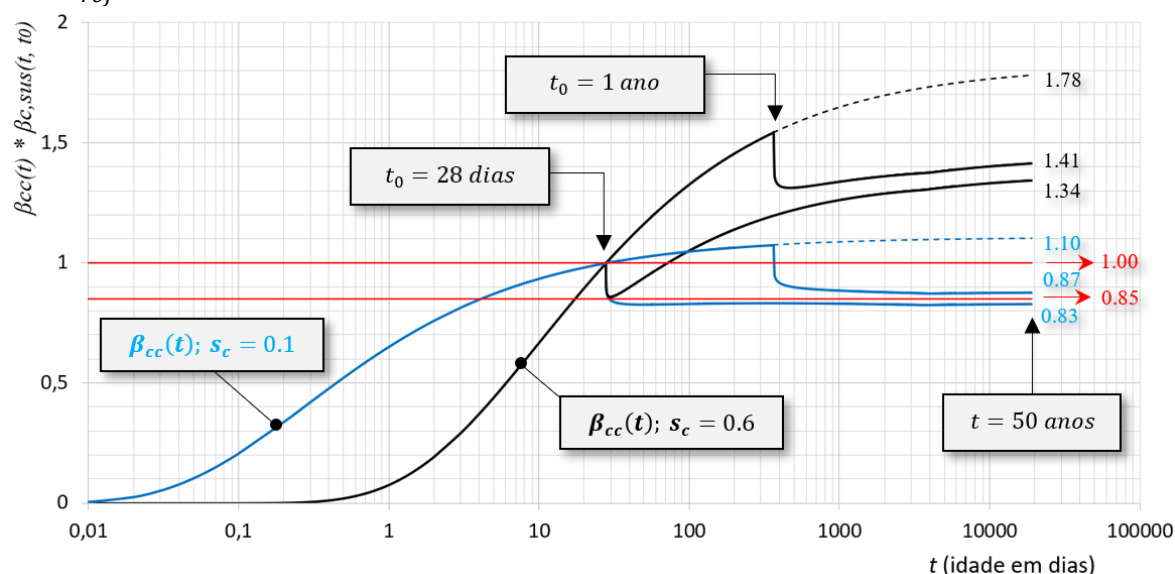
6.4 Metodologia de análise do efeito combinado do crescimento e do decréscimo da resistência

Com base nas expressões de crescimento e decréscimo relativos da resistência à compressão do concreto consideradas como referência neste trabalho, é possível analisar o desenvolvimento da resistência à compressão do concreto considerando o efeito combinado desses fenômenos antagônicos, através do produto das funções $\beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0)$.

O resultado deste produto dá origem a inúmeras curvas que se desenvolvem em função da idade, das características do concreto e da data de aplicação da carga elevada e mantida por períodos superiores a 20 minutos.

A Figura 6.6 ilustra a envoltória das curvas para cargas aplicadas aos 28 e 365 dias de idade, considerando-se uma idade de controle e referência (t_{ref}) de 28 dias e os diferentes concretos, caracterizados por $0,1 \leq s_c \leq 0,6$.

Figura 6.6 – Envoltória das curvas de evolução relativa da resistência à compressão até os 50 anos de idade para cargas elevadas de longa duração aplicadas a 28 e 365 dias, com $t_{ref} = 28$ dias.



Fonte: Boni, Silva e Helene (2025)¹³².

Neste trabalho, tendo como base os valores de s_c obtidos por meio dos dados históricos e atuais e do efeito combinado do crescimento e do decréscimo da resistência, ou seja, do produto $\beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0)$, estes últimos serão analisados e confrontados com os valores dos coeficientes redutores da resistência de cálculo adotados pelo *fib* Model Code 2020 (α_{cc}) e pela norma ABNT NBR 6118:2023.

¹³² BONI, Ricardo; SILVA, Rafael; HELENE, Paulo. An alternative method for calculating concrete design compressive strength, fcd. In: INTERNATIONAL FIB SYMPOSIUM, 2025, Rio de Janeiro. **Conceptual design of Structures**. Rio de Janeiro: Fédération Internationale de Béton, 2025. p. 234-241.

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

As discussões aqui apresentadas contemplam estudos realizados em argamassas e concretos, uma vez que, no contexto de análise de resistência adotado, não se faz distinção entre estes materiais, pois a diferenciação entre eles, neste caso, é apenas convencional. Ambos são obtidos pela reunião de agregados com pasta cimentante de base cimento Portland. Neste contexto, a única diferença é o diâmetro dos agregados utilizados.

Isto posto, aplicando a metodologia de análise dos *dados históricos e atuais* apresentados no Capítulo 6, determina-se os coeficientes de crescimento de resistência à compressão (s_c). Na sequência, os resultados obtidos são analisados e discutidos considerando os diferentes tipos de cimento e de relações água/cimento dos traços ($0,35 \leq w/c \leq 0,80$).

É importante registrar que, atualmente no Brasil, as relações $w/c > 0,65$ não são permitidas quando da produção de concretos estruturais, uma vez que a norma ABNT NBR 6118:2023 estabelece em seu item 7 “*Critérios de projeto que visam a durabilidade*” uma relação w/c máxima de 0,65. No que se refere à norma europeia, a mesma relação $w/c = 0,65$ é estabelecida como limite máximo, conforme registrado no Annex F “*Recommendation for limiting values of concrete composition*” da norma EN 206:2013 “*Concrete – Specification, performance, production and conformity*” (CEN, 2013).

Por fim, considera-se o efeito da carga elevada de longa duração (efeito Rüschi) aplicado nas curvas de crescimento dos traços estudados, de maneira a se obter informações para uma análise comparativa com o coeficiente redutor da resistência de projeto α_{cc} , prescrito pelo *fib* Model Code 2020.

7.1 Fonte histórica: Epaminondas Melo do Amaral Filho (1939 a 1943)

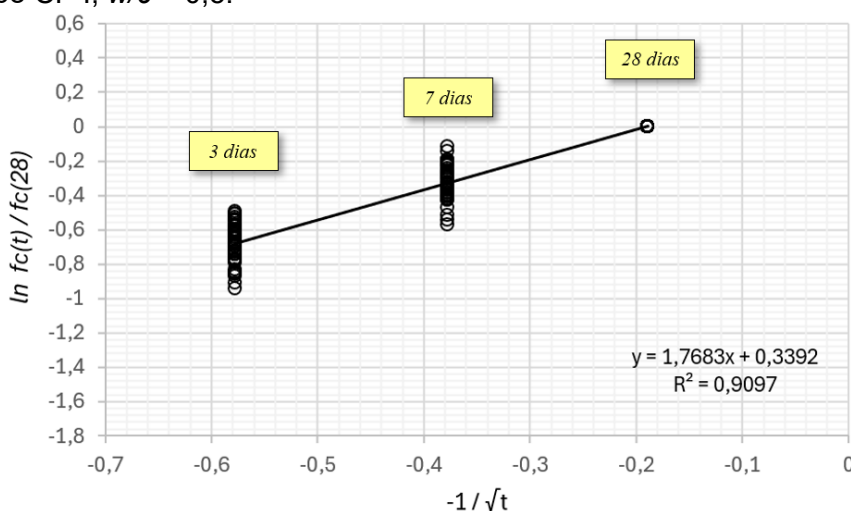
A pesquisa experimental de Amaral Filho (1945) realizada no IPT está apresentada em detalhes no Anexo A desta dissertação.

Com os resultados de resistência à compressão da referida pesquisa foram elaborados 12 gráficos que apresentam as curvas médias de crescimento de

resistência linearizadas, por meio da análise de resultados aos 3, 7 e 28 dias de idade, considerando concretos produzidos com cimento tipo CP I, oriundos de 3 diferentes fábricas nacionais (A, S e D) e 4 diferentes relações w/c (0,5; 0,6; 0,7 e 0,8) produzidos entre janeiro de 1939 a janeiro de 1943. Estes gráficos, assim como as equações das retas médias correspondentes estão apresentados no Anexo I desta dissertação.

Como exemplo, na Figura 7.1, apresenta-se 1 dos 12 gráficos mencionados no parágrafo anterior. Neste caso, nota-se que, por meio da análise dos resultados de resistência de um concreto produzido com cimento da Fábrica D, com relação $w/c = 0,5$, obteve-se uma curva média de crescimento de resistência linearizada com equação igual a: $y = 1,7683x + 0,3392$ ($R^2 = 0,9097$), ou seja, um coeficiente de crescimento s_c igual a $1,7683/\sqrt{28} = 0,33$.

Figura 7.1 – Representação linear da curva de crescimento do concreto produzido com o cimento D, tipo CP I, $w/c = 0,5$.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados históricos de Amaral Filho (1945).

Desta maneira, utilizando as 12 equações apresentadas nos gráficos do Anexo I, tornou-se possível encontrar os coeficientes de crescimento da resistência (s_c) para cada um dos concretos analisados, todos produzidos com cimento tipo CP I característicos da época. A Tabela 7.1 apresenta os resultados obtidos.

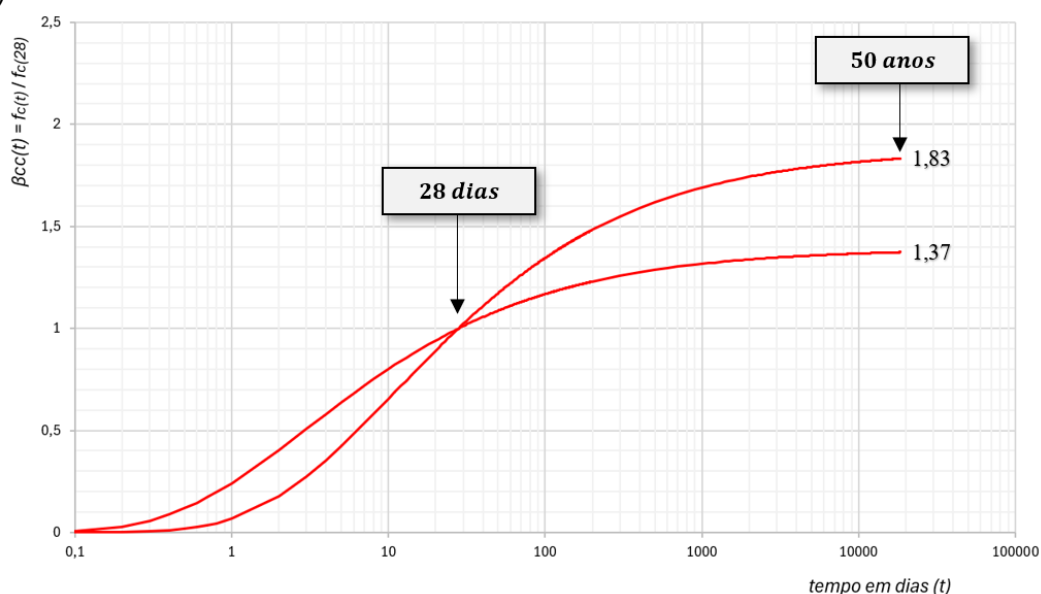
Tabela 7.1 – Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes s_c de Amaral Filho (1945).

Relação w/c	Coeficiente s_c		
	CP I - Fábrica A	CP I - Fábrica S	CP I - Fábrica D
0,50	0,41	0,33	0,33
0,60	0,49	0,38	0,37
0,70	0,56	0,41	0,44
0,80	0,63	0,47	0,50

Fonte: Elaborada pelo autor por meio da análise das equações linearizadas apresentadas nos gráficos do Anexo I.

Para melhor visualização dos resultados obtidos, a Figura 7.2 apresenta as envoltórias das curvas de crescimento relativo de resistência considerando os coeficientes s_c extremos ($s_c = 0,33$ e $s_c = 0,63$). No Anexo J é possível visualizar singularmente todas as 12 curvas de crescimento relativo da resistência, conforme fábricas, relações w/c e coeficientes s_c apresentados na Tabela 7.1.

Figura 7.2 – Envoltória das curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de concretos produzidos com cimento tipo CP I, Fábricas A, D e S, da pesquisa de Amaral Filho (1945).



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Amaral Filho (1945).

Nota-se que os coeficientes de crescimento obtidos variaram entre $0,33 \leq s_c \leq 0,63$, a depender da fábrica de cimento considerada e da relação w/c utilizada no traço. O crescimento da resistência após 50 anos de idade em relação aos 28 dias variou entre $1,37 \leq f_{c(50 \text{ anos})} / f_{c(28)} \leq 1,83$.

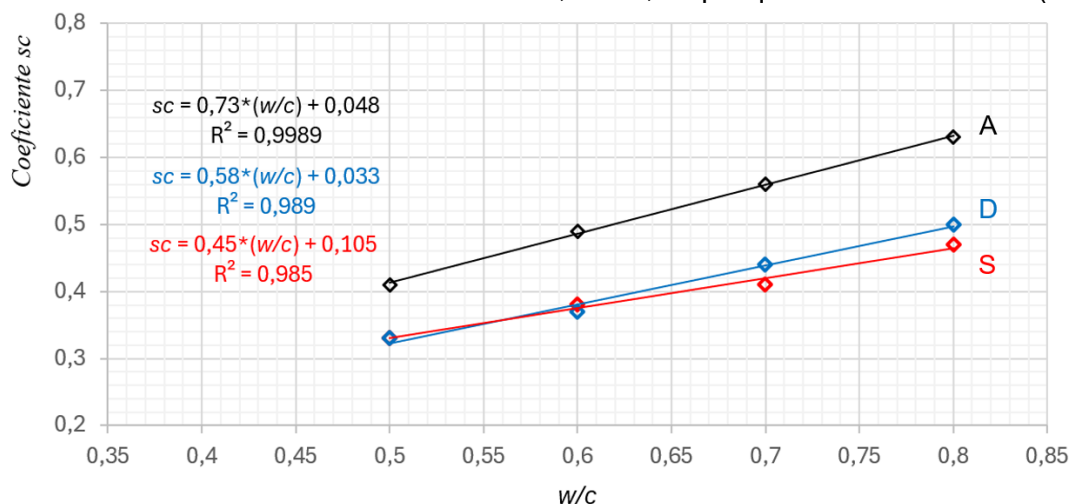
Observa-se na Tabela 7.1 que os valores obtidos de s_c são significativamente maiores que os adotados como referência para o cimento Portland tipo CP I pela norma ABNT NBR 6118:2023 ($s = 0,25$). Isso significa dizer que, em idades avançadas, o coeficiente de crescimento adotado na atual NBR 6118 implica em resistências relativas inferiores às observadas na pesquisa de Amaral Filho (1945).

Quando os mesmos resultados apresentados na Tabela 7.1 são comparados com os valores de s_c adotados pelo *fib* Model Code 2020 para o cimento Portland Classes CN e CS ($0,3 \leq s_c \leq 0,6$), observa-se que os resultados são concordantes.

Nota-se ainda que para concretos produzidos com o cimento de uma mesma fábrica, o coeficiente de crescimento da resistência à compressão obtido (s_c) é direta

e linearmente proporcional à relação água/cimento (w/c) adotada, como pode ser observado graficamente na Figura 7.3.

Figura 7.3 – Coeficiente s_c em função da relação água/cimento (w/c) para concretos produzidos com cimento CP I das Fábricas A, D e S, da pesquisa de Amaral Filho (1945).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em todos os casos apresentados na Figura 7.3, nota-se uma forte correlação linear entre o coeficiente de crescimento s_c e a relação w/c , indicando que quanto maior a relação w/c , maior o coeficiente de crescimento s_c obtido.

Tal fato corrobora com o que foi demonstrado teoricamente no subitem 3.4 “*Evolução da Resistência à Compressão com a Idade*” da tese de doutorado de Helene (1987) e com as premissas do *fib Model Code for Concrete Structures 2020*, que considera, para um mesmo tipo de cimento, uma variação do coeficiente s_c , conforme a classe de resistência do concreto, como detalhado no subitem 4.6 “*Modelo fib Model Code 2020*” desta dissertação.

Ainda neste contexto, Cánovas (1993)¹³³ registra que a relação água/cimento do concreto exerce importante influência na dinâmica das reações químicas, na medida que:

- ✓ quanto menor a relação w/c , mais próximos se encontram os grãos de cimento e, conseqüentemente, os produtos de hidratação podem formar um sistema estável de maneira mais rápida, resultando em taxas de crescimento mais aceleradas nas primeiras idades, ou seja, menores valores de s_c .

¹³³ CÁNOVAS, Manuel Fernández. **Hormigón**. 3. ed. Madrid: Rugarte, S. L., 1993. 543 p.

Já a atual norma ABNT NBR 6118:2023 não considera essa forte influência da relação w/c e nem da classe de resistência do concreto para a determinação do coeficiente de crescimento da resistência, limitando-se a utilizar um coeficiente de crescimento somente em função do tipo de cimento utilizado no traço de concreto, vide Tabela 4.12.

7.2 Fonte histórica: Carlos Eduardo de Siqueira Tango (1957 a 1979)

Os dados de resistência à compressão da fonte histórica obtida em Tango (1983) representam os resultados de ensaios que constam nos Certificados de Coleta de Amostras do IPT. Estes também foram analisados de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 6 para a determinação dos coeficientes de crescimento (s_c) de concretos produzidos entre os anos de 1957 e 1979, ou seja, durante um período de 23 anos. Os resultados de resistência e as variáveis da referida pesquisa experimental estão apresentados detalhadamente no Anexo B desta dissertação.

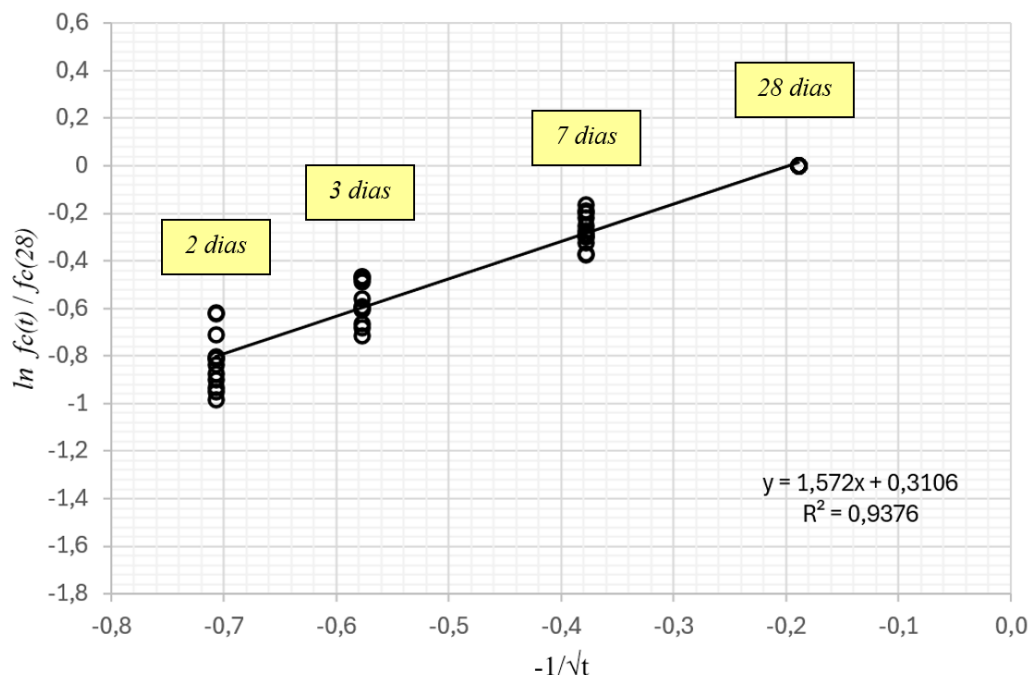
Em resumo, os traços estudados foram produzidos com cimentos oriundos de 3 diferentes fábricas (cimentos das marcas A, B e C), todos do tipo cimento Portland comum (CP I) e com relações w/c variando de 0,45, 0,55, 0,65 e 0,75.

Vale registrar que as relações água/cimento adotadas no estudo original são um pouco variáveis dentro da mesma família de traço considerada. Sendo assim, os valores de w/c mencionados no parágrafo anterior representam os valores médios adotados. Como essas variações são de pequena monta (de maneira geral inferiores a 5%), não há prejuízo algum ao que se deseja demonstrar nesta dissertação.

Os coeficientes de crescimento s_c foram determinados por meio das equações linearizadas das curvas de crescimento de resistência. Dada a elevada quantidade de curvas linearizadas analisadas nesta fonte histórica (total de 276 gráficos), optou-se por apresentá-las no Anexo K.

A Figura 7.4, a título de exemplo, apresenta uma das curvas linearizadas utilizadas para a obtenção do coeficiente de crescimento s_c , com base em resultados de resistência à compressão obtidos aos 2, 3, 7 e 28 dias de idade, para um concreto de relação $w/c = 0,45$, produzido com cimento da marca B no ano de 1965.

Figura 7.4 – Representação linear da curva de crescimento do concreto produzido com o cimento B, tipo CP I, $w/c = 0,45$.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados históricos de Tango (1983).

Observa-se que a curva média de crescimento de resistência linearizada possui equação igual a: $y = 1,572x + 0,3106$ ($R^2 = 0,9376$), ou seja, um coeficiente de crescimento s_c igual a $1,572/\sqrt{28} = 0,30$.

A Tabela 7.2 apresenta o resumo dos resultados de s_c obtidos com base nos gráficos e equações linearizadas apresentadas no Anexo K, considerando o ano de produção do concreto (de 1957 até 1979), fábricas e cimentos utilizados (marcas A, B e C), assim como as diferentes relações água/cimento adotadas (0,45, 0,55, 0,65 e 0,75).

Tabela 7.2 – Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes s_c de Tango (1983).

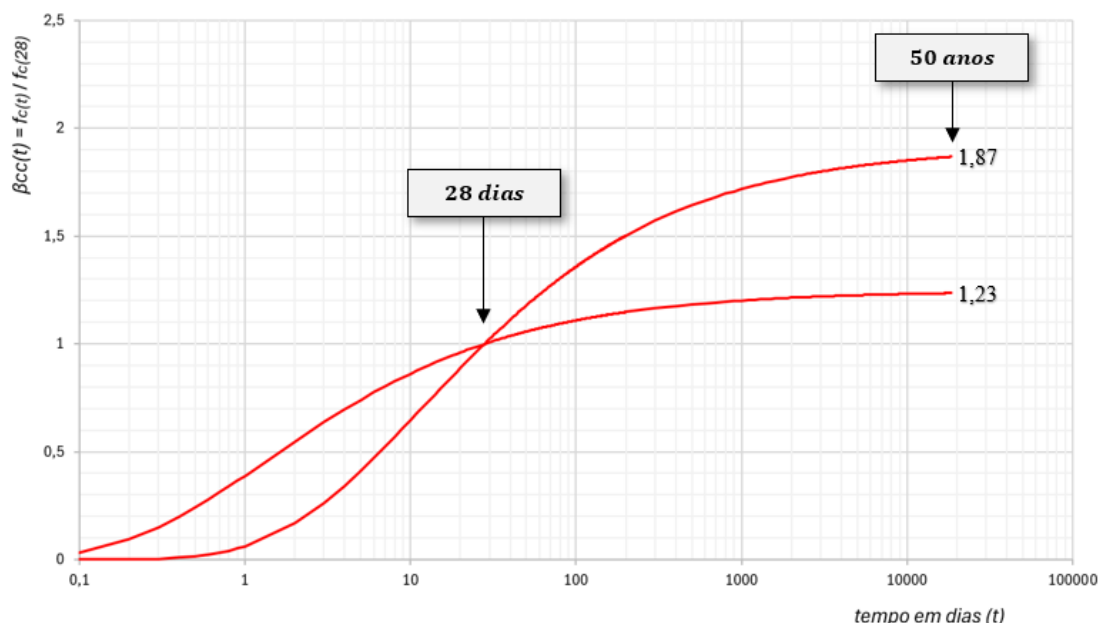
Ano de Produção	s_c											
	Cimento CP I - Marca A				Cimento CP I - Marca B				Cimento CP I - Marca C			
	Relação w/c				Relação w/c				Relação w/c			
	0,45	0,55	0,65	0,75	0,45	0,55	0,65	0,75	0,45	0,55	0,65	0,75
1957	0,45	0,54	0,59	0,62	0,37	0,43	0,50	0,54	0,32	0,40	0,42	0,49
1958	0,47	0,53	0,59	0,63	0,37	0,43	0,50	0,55	0,36	0,40	0,45	0,49
1959	0,42	0,48	0,56	0,61	0,40	0,47	0,52	0,62	0,34	0,36	0,42	0,46
1960	0,51	0,51	0,59	0,64	0,41	0,46	0,53	0,65	0,34	0,36	0,42	0,46
1961	0,40	0,46	0,53	0,58	0,36	0,43	0,48	0,58	0,35	0,38	0,44	0,49
1962	0,40	0,44	0,51	0,58	0,36	0,42	0,51	0,59	0,36	0,40	0,46	0,51
1963	0,45	0,50	0,56	0,62	0,33	0,38	0,44	0,53	0,38	0,43	0,49	0,54
1964	0,51	0,56	0,60	0,64	0,33	0,37	0,43	0,49	0,49	0,55	0,57	0,64
1965	0,47	0,52	0,58	0,62	0,30	0,33	0,39	0,47	0,48	0,53	0,58	0,60
1966	0,40	0,45	0,50	0,57	0,32	0,36	0,44	0,54	0,47	0,51	0,55	0,60
1967	0,42	0,47	0,53	0,61	0,35	0,40	0,48	0,59	0,45	0,51	0,55	0,60
1968	0,45	0,52	0,58	0,64	0,36	0,42	0,52	0,63	0,40	0,45	0,52	0,58
1969	0,44	0,49	0,56	0,58	0,33	0,41	0,49	0,58	0,42	0,49	0,54	0,58
1970	0,42	0,47	0,50	0,54	0,26	0,31	0,37	0,43	0,32	0,38	0,42	0,45
1971	0,42	0,49	0,54	0,56	0,27	0,32	0,40	0,45	0,25	0,31	0,38	0,41
1972	0,36	0,43	0,48	0,52	0,22	0,27	0,34	0,40	0,25	0,31	0,36	0,39
1973	0,38	0,46	0,52	0,53	0,24	0,29	0,34	0,41	0,26	0,32	0,38	0,44
1974	0,40	0,46	0,51	0,53	0,24	0,31	0,36	0,41	0,30	0,37	0,43	0,47
1975	0,38	0,44	0,51	0,51	0,23	0,28	0,34	0,40	0,33	0,40	0,46	0,48
1976	0,36	0,41	0,48	0,51	0,24	0,30	0,35	0,40	0,33	0,40	0,46	0,49
1977	0,31	0,37	0,42	0,45	0,27	0,31	0,38	0,44	0,33	0,38	0,42	0,46
1978	0,36	0,45	0,52	0,56	0,27	0,33	0,41	0,46	0,31	0,37	0,43	0,48
1979	0,36	0,41	0,51	0,53	0,29	0,36	0,42	0,50	0,23	0,26	0,32	0,38
Média	0,41	0,47	0,53	0,57	0,31	0,36	0,43	0,51	0,35	0,40	0,46	0,50
Desv. padrão	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07
Coef.de variação (%)	12,2	9,7	8,4	9,0	18,6	16,7	15,3	16,2	21,0	18,6	15,2	14,3

Fonte: Elaborada pelo autor por meio das equações linearizadas apresentadas no Anexo K.

Nota-se que os coeficientes de crescimento obtidos variaram entre $0,22 \leq s_c \leq 0,65$, a depender da marca de cimento considerada e da relação w/c utilizada no traço. Ainda, novamente, nota-se que quanto maior a relação w/c, maior o coeficiente s_c obtido.

A Figura 7.5 apresenta as envoltórias das curvas de crescimento de resistência considerando os coeficientes s_c extremos mencionados no parágrafo anterior, para $t_{ref} = 28$ dias.

Figura 7.5 – Envoltória das curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de concretos produzidos com cimento tipo CP I, Marcas A, B e C, da pesquisa de Tango (1983).



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Tango (1983).

No Anexo L estão apresentadas as curvas de crescimento da resistência a compressão considerando os valores médios de s_c (vide linha destacada em azul na Tabela 7.2), para as diferentes marcas de cimento (A, B e C) e as relações água/cimento w/c (0,45, 0,55, 0,65 e 0,75).

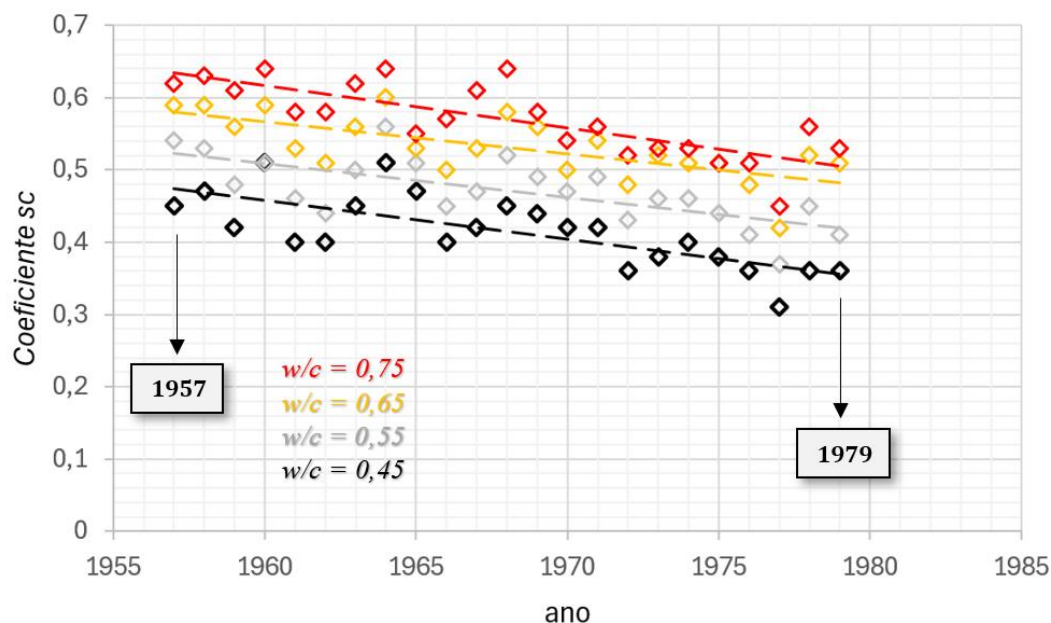
Observa-se na Figura 7.5 que o crescimento da resistência após 50 anos de idade em relação aos 28 dias, variou entre $1,23 \leq f_{c(50 \text{ anos})}/f_{c(28)} \leq 1,87$.

A norma ABNT NBR 6118:2023, não permite que resultados de resistência sejam extrapolados para idades superiores a 28 dias, portanto, não há como comparar os resultados de crescimento relativo obtidos com o modelo proposto pela referida norma. Entretanto, se considerado o modelo proposto pelo *fib* Model Code 2020, para concretos de $f_{ck} \leq 35$ MPa, o crescimento relativo deve variar entre $1,33 \leq f_{c(50 \text{ anos})}/f_{c(28)} \leq 1,78$, ou seja, coerentes, porém, com maior amplitude quando comparado com os valores encontrados utilizando os dados históricos da pesquisa experimental de Tango (1983).

Ainda, dado o longo período de coleta dos dados históricos utilizados por Tango (1983), entre os anos de 1957 e 1979 (ou seja, 23 anos), tornou-se possível, para uma mesma relação w/c , efetuar uma análise dos valores dos coeficientes de crescimento da resistência ao longo do tempo, considerando sempre concretos produzidos com o mesmo tipo e marca de cimento.

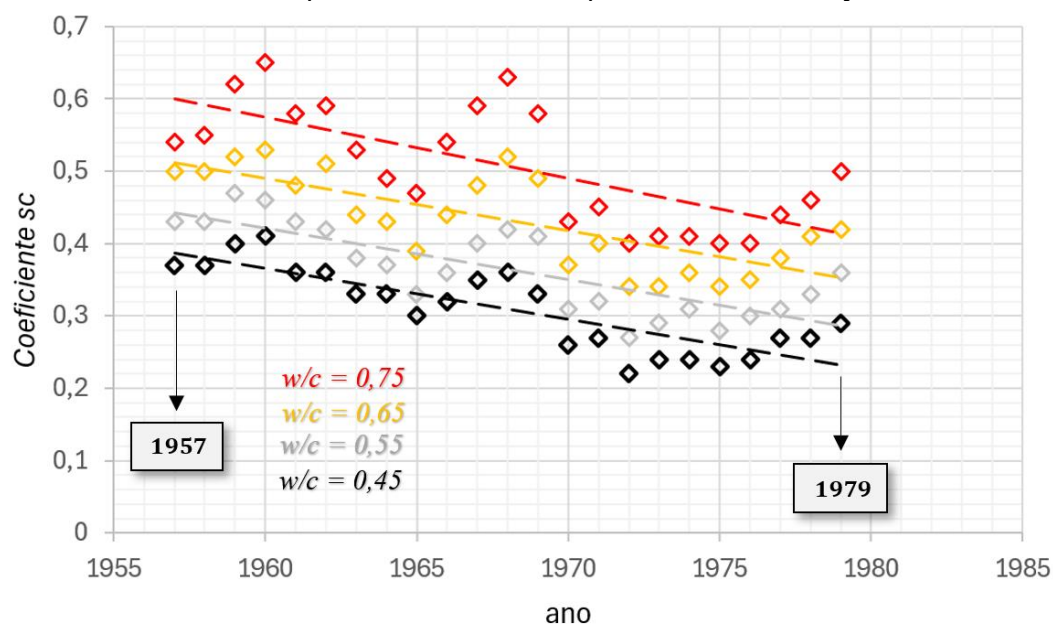
As Figuras 7.6 a 7.8 apresentam os valores do coeficiente de crescimento da resistência para as 3 diferentes marcas de cimento (A, B e C) e para relações w/c variando de 0,45 a 0,75.

Figura 7.6 – Valores do coeficiente de crescimento s_c ao longo do tempo para concretos produzidos com cimento tipo CP I, da marca A, para diferentes relações w/c .



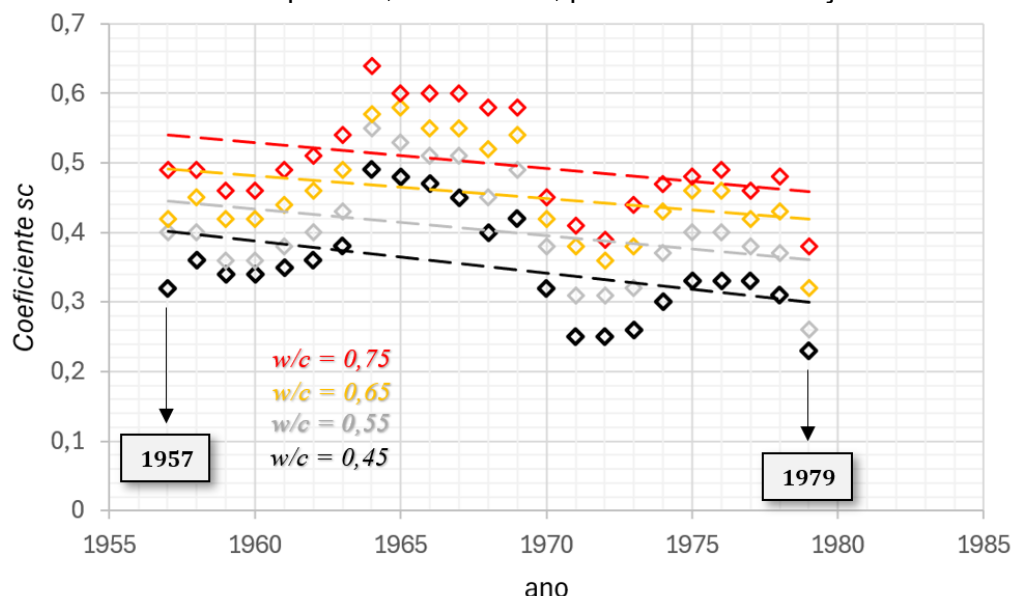
Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos resultados apresentados na Tabela 7.2.

Figura 7.7 – Valores do coeficiente de crescimento s_c ao longo do tempo para concretos produzidos com cimento tipo CP I, da marca B, para diferentes relações w/c .



Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos resultados apresentados na Tabela 7.2.

Figura 7.8 – Valores do coeficiente de crescimento s_c ao longo do tempo para concretos produzidos com cimento tipo CP I, da marca C, para diferentes relações w/c .



Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos resultados apresentados na Tabela 7.2.

Por meio da análise das Figuras 7.6 a 7.8 é possível observar novamente que quanto maior a relação w/c , maior o valor do coeficiente de crescimento s_c obtido. Além disso, nota-se que, em todos os casos, as linhas de tendência apontaram para uma redução no valor do coeficiente s_c ao longo do tempo.

Ainda, nota-se visualmente que as linhas de tendência, de maneira geral, apresentam propensão ao paralelismo. Por fim, nota-se mudanças de centralização do coeficiente s_c ao longo do tempo, situação bem evidenciada na Figura 7.8, entre os anos de 1964 e 1970.

É importante registrar que a redução no valor do coeficiente s_c observado ao longo do tempo não significa que concretos produzidos com cimentos mais recentes apresentam maiores resistências. Tal fato indica apenas que o crescimento relativo da resistência é maior nas primeiras idades e menor em idade avançadas.

Apesar do conceito de cimento Portland comum (CP I) ser o mesmo desde a publicação da Especificação Brasileira EB - 1 em 1937 (ABNT, 1937)¹³⁴ até a atual norma ABNT NBR 16697:2018 “Cimento Portland – Requisitos” (ABNT, 2018b), ou seja, cimento obtido da mistura e moagem de clínquer Portland (> 90%, em massa) com gipsita (< 5%, em massa), sem adição de outras matérias-primas, dado o longo período de amostragem (23 anos), pequenas variações na composição (dentro dos

¹³⁴ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **EB - 1**: Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro: Abnt, 1937. 3 p.

limites normativos vigentes no período) e a influência da moagem mais fina do cimento (vide subitem 3.2 “*Finura do cimento*” desta dissertação) podem explicar a redução no valor do coeficiente s_c observado ao longo do tempo.

7.3 Fonte histórica: Paulo Helene (1987)

Helene (1987) apresentou um relevante estudo que envolveu, entre outros assuntos, a análise das curvas de crescimento da resistência com o tempo. O estudo contemplou 6 diferentes tipos de cimento, CP 32, POZ 32, AF 32, CP 25, POZ 25 e AF 25, oriundos de 56 diferentes fábricas, configurando amostras representativas de todos os cimentos nacionais disponíveis na época.

Os dados de resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 91 dias de idade, assim como as particularidades do estudo de Helene (1987) estão detalhados no Anexo C desta dissertação.

O estudo em questão analisou os resultados de resistência por meio da seguinte expressão:

$$\frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = \frac{k_{11}}{k_{12}^{1/\sqrt{t}}} \quad (2.15)$$

Onde:

$f_{c(t)}$: resistência à compressão na idade t , em MPa;

$f_{c(28)}$: resistência à compressão na idade 28 dias, em MPa;

k_{11} e k_{12} : coeficientes que dependem dos materiais e das características do traço;

t : idade, em dias.

A Tabela 7.3 apresenta, para cada um dos tipos de cimento e relações w/c estudados, as expressões de crescimento da resistência obtidas por Helene (1987) tendo como referência os coeficientes k_{11} e k_{12} da Equação 2.15.

Tabela 7.3 – Resumo dos resultados obtidos por Helene (1987) para os coeficientes k_{11} e k_{12} das curvas de crescimento da resistência à compressão, conforme Equação 2.15.

Tipo e classe do cimento	Relação w/c	Coeficientes		Tipo e classe do cimento	Relação w/c	Coeficientes	
		k_{11}	k_{12}			k_{11}	k_{12}
CP 32	0,38	1,35	4,95	CP 25	0,38	1,50	8,52
	0,48	1,41	6,23		0,48	1,76	19,8
	0,58	1,52	9,22		0,58	1,88	27,9
	0,68	1,64	13,6		0,68	1,99	38,4
	0,78	1,69	16,2		0,78	2,06	45,6
POZ 32	0,38	1,40	5,93	POZ 25	0,38	1,67	15,2
	0,48	1,43	6,69		0,48	1,74	18,5
	0,58	1,55	10,3		0,58	1,89	29,4
	0,68	1,68	15,5		0,68	1,91	30,4
	0,78	1,81	23,2		0,78	1,98	37,4
AF 32	0,38	1,60	12,2	AF 25	0,38	1,50	8,52
	0,48	1,65	14,2		0,48	1,76	19,8
	0,58	1,84	25,3		0,58	1,88	27,9
	0,68	1,94	33,0		0,68	1,99	38,4
	0,78	2,08	48,6		0,78	2,06	45,6

Nota: Importante notar que existe uma relação de interdependência entre os coeficientes k_{11} e k_{12} da Equação 2.15, dada por: $k_{12} = k_{11} * \sqrt{28} \approx 5,3 * k_{11}$.

Fonte: Resumo adaptado de Helene (1987), p. 96.

As premissas de análise adotadas por Helene (1987), permitiram que os resultados por ele obtidos fossem analisados de uma maneira distinta, porém, equivalente aos demais estudos apresentados nesta dissertação.

Sendo assim, para a determinação do coeficiente s_c , à luz do atual modelo *fib* Model Code 2020, utilizou-se $k_{11} = e^{s_c}$, ou ainda, $s_c = \ln k_{11}$, conforme detalhado na metodologia de análise apresentada no Capítulo 6 desta dissertação. Desta maneira, apresenta-se os valores do coeficiente s_c obtidos para os diferentes tipos de cimento e relações w/c, conforme indicado na Tabela 7.4.

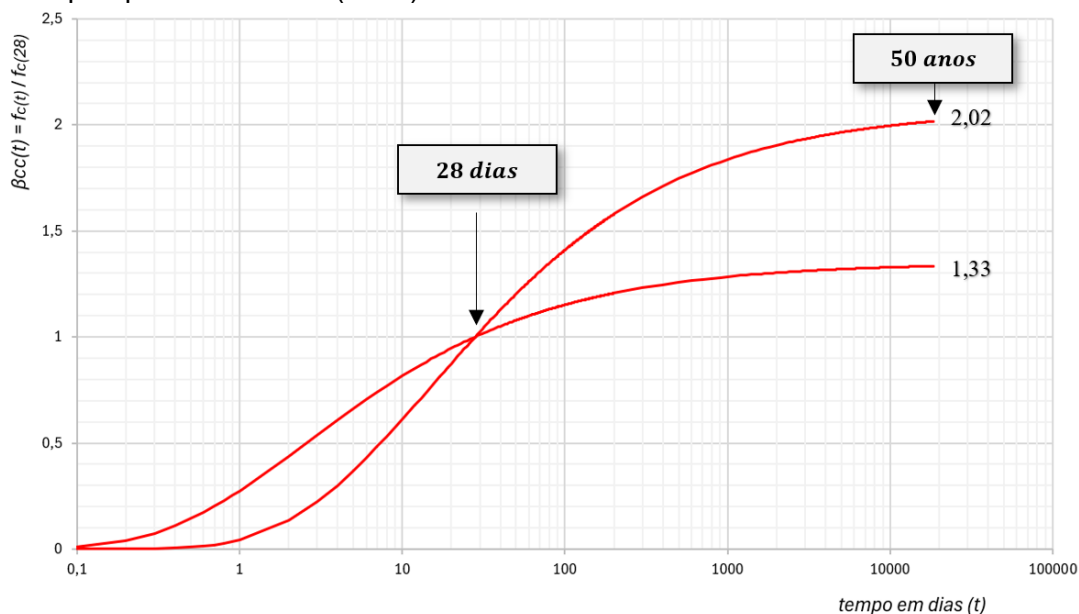
Tabela 7.4 – Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes s_c das curvas de crescimento. Fonte histórica: Helene (1987).

Tipo e classe do cimento	Relação w/c	Coeficiente s_c	Tipo e classe do cimento	Relação w/c	Coeficiente s_c
CP 32	0,38	0,30	CP 25	0,38	0,34
	0,48	0,34		0,48	0,37
	0,58	0,42		0,58	0,44
	0,68	0,49		0,68	0,52
	0,78	0,52		0,78	0,56
POZ 32	0,38	0,34	POZ 25	0,38	0,40
	0,48	0,36		0,48	0,56
	0,58	0,44		0,58	0,63
	0,68	0,52		0,68	0,69
	0,78	0,59		0,78	0,72
AF 32	0,38	0,47	AF 25	0,38	0,51
	0,48	0,50		0,48	0,55
	0,58	0,61		0,58	0,64
	0,68	0,66		0,68	0,65
	0,78	0,73		0,78	0,68

Fonte: Elaborada pelo autor, a partir dos resultados da pesquisa experimental de Helene (1987).

O Anexo M apresenta todas as curvas de crescimento relativo obtidas por Helene (1987), conforme os tipos e classes de resistência dos cimentos utilizados, considerando as diferentes relações w/c e os coeficientes s_c correspondentes obtidos, conforme indicado na Tabela 7.4. A Figura 7.9 apresenta graficamente as envoltórias das curvas de crescimento obtidas: $0,30 \leq s_c \leq 0,73$.

Figura 7.9 – Envoltória das curvas de crescimento relativo da resistência à compressão, conforme pesquisa de Helene (1987).



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Helene (1987).

Ainda, conforme demonstrado no subitem 4.5 “*Modelo CEB-FIP Model Code 1990 e fib Model Code 2010*” desta dissertação, a resistência última relativa à resistência aos 28 dias ($f_{c(\infty)} / f_{c(28)}$) é dada por:

$$f_{c(\infty)} = \lim_{t \rightarrow \infty} e^{s_c \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right]} * f_{c(28)} \rightarrow f_{c(\infty)} = e^{s_c * [1 - \sqrt{0}]} * f_{c(28)}$$

$$f_{c(\infty)} = e^{s_c} * f_{c(28)} \rightarrow \frac{f_{c(\infty)}}{f_{c(28)}} = e^{s_c} \quad (4.40)$$

Sendo assim, o coeficiente k_{11} , utilizado na equação adotada por Helene (1987) indica o percentual de crescimento da resistência na idade última do concreto em relação à resistência aos 28 dias.

Neste contexto, a Tabela 7.5 apresenta o crescimento relativo das resistências para a idade última ($f_{c(\infty)} / f_{c(28)} = e^{s_c} = k_{11}$) e para a idade de 50 anos ($f_{c(50 \text{ anos})} / f_{c(28)}$).

Tabela 7.5 – Crescimento relativo da resistência do concreto para os traços estudados.

Tipo de cimento	w/c	s _c	Crescimento relativo		Tipo de cimento	w/c	s _c	Crescimento relativo	
			$f_{c(50 \text{ anos})} / f_{c(28)}$	$f_{c(\infty)} / f_{c(28)}$				$f_{c(50 \text{ anos})} / f_{c(28)}$	$f_{c(\infty)} / f_{c(28)}$
CP 32	0,38	0,30	1,33	1,35	CP 25	0,38	0,34	1,39	1,40
	0,48	0,34	1,39	1,41		0,48	0,37	1,43	1,45
	0,58	0,42	1,50	1,52		0,58	0,44	1,53	1,56
	0,68	0,49	1,60	1,64		0,68	0,52	1,65	1,68
	0,78	0,52	1,65	1,69		0,78	0,56	1,71	1,75
POZ 32	0,38	0,34	1,39	1,40	POZ 25	0,38	0,40	1,47	1,50
	0,48	0,36	1,41	1,43		0,48	0,56	1,71	1,76
	0,58	0,44	1,53	1,55		0,58	0,63	1,83	1,88
	0,68	0,52	1,65	1,68		0,68	0,69	1,94	1,99
	0,78	0,59	1,76	1,81		0,78	0,72	2,00	2,06
AF 32	0,38	0,47	1,57	1,60	AF 25	0,38	0,51	1,63	1,67
	0,48	0,50	1,62	1,65		0,48	0,55	1,70	1,74
	0,58	0,61	1,80	1,84		0,58	0,64	1,85	1,89
	0,68	0,66	1,88	1,94		0,68	0,65	1,87	1,91
	0,78	0,73	2,02	2,08		0,78	0,68	1,92	1,98

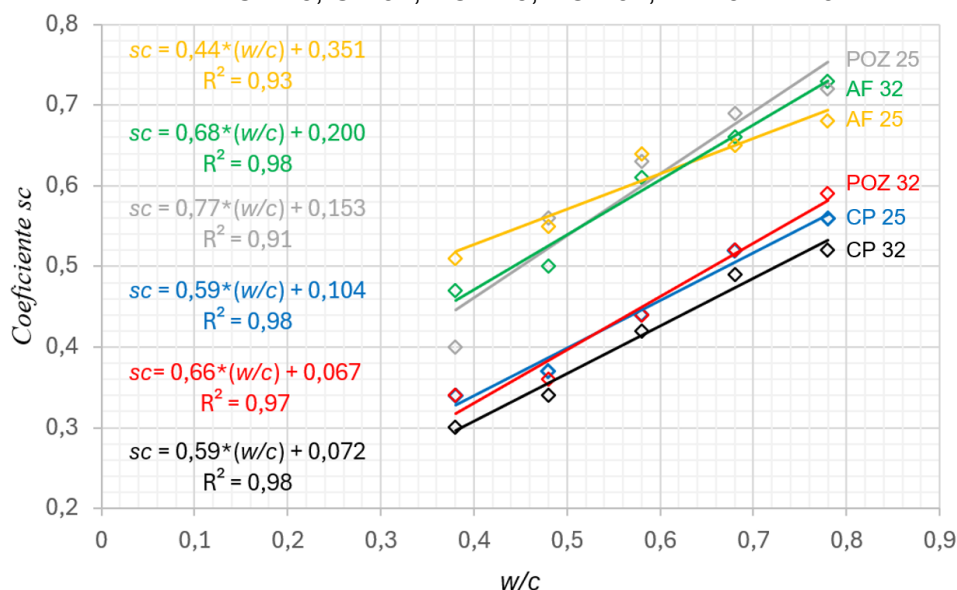
Fonte: Elaborada pelo autor, com base na pesquisa experimental de Helene (1987).

Nota-se na Tabela 7.5 que, comparativamente, os cimentos com adições apresentaram maiores valores de s_c em relação ao cimento Portland comum, ou seja, crescimento mais lento nas primeiras idades, como esperado. Se considerado relações $w/c \leq 0,65$, os valores dos coeficientes de crescimento variaram entre $0,30 \leq s_c \leq 0,64$, ou seja, muito próximo dos limites estabelecidos pelo *fib* Model Code 2020.

Com base nos resultados apresentados na tabela anterior, também é possível constatar por meio da razão $f_{c(\infty)} / f_{c(50 \text{ anos})}$ que o crescimento relativo da resistência a partir dos 50 anos de idade é ínfimo, uma vez que varia de $1,01 \leq f_{c(\infty)} / f_{c(50 \text{ anos})} \leq 1,03$, ou seja, o crescimento máximo relativo após os 50 anos de idade é da ordem de 3%.

Ainda, quanto maior a relação w/c , maior o valor de s_c obtido. Nota-se, ao analisar os resultados apresentados na tabela anterior, que as variáveis relação água/cimento (w/c) e coeficiente de crescimento (s_c) de cada tipo de cimento estão associadas a uma função linear, como apresentado graficamente na Figura 7.10.

Figura 7.10 – Coeficiente s_c em função da relação água/cimento (w/c) para concretos produzidos com cimentos CP 25, CP 32, POZ 25, POZ 32, AF 25 e AF 32.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos dados da pesquisa experimental de Helene (1987).

Portanto, admite-se que o coeficiente s_c é diretamente proporcional a relação w/c . Em todos os casos o valor de R^2 (r-quadrado) ficou acima de 0,90 (em vários casos muito próximo de 1,0), apontando para uma forte correlação entre as variáveis w/c e s_c quando da utilização de uma função linear do tipo: $s_c = k_m \cdot (w/c) + k_n$, onde k_m e k_n são coeficientes que variam de acordo com o tipo e classe de cimento utilizados.

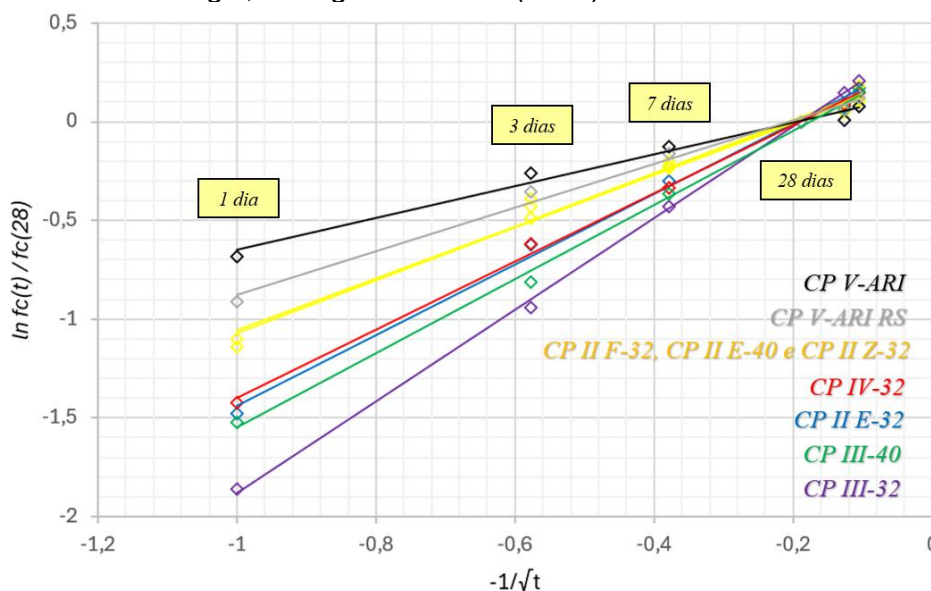
7.4 Fonte histórica: Battagin, Battagin e Munhóz (2010)

Battagin, Battagin e Munhóz (2010) utilizaram em seu estudo resultados de resistência média à compressão de 580 amostras dos principais tipos de cimentos produzidos no país, são eles: CP II-E-32, CP II-F-32, CP II-E-40, CP II-Z-32, CP III-32, CP III-40, CP IV-32, CP V-ARI e CPV-ARI RS, fabricados em diversas unidades brasileiras em diferentes regiões do Brasil. Em todos os casos, adotou-se uma única relação $w/c = 0,48$.

Os dados históricos utilizados e as premissas deste estudo estão apresentados no Anexo D.

Por meio dos resultados de resistência à compressão obtidos nas idades 1, 3, 7, 28, 63 e 91 dias e da metodologia descrita no Capítulo 6, as curvas de crescimento foram linearizadas, conforme apresentado na Figura 7.11.

Figura 7.11 – Representação linear das curvas de crescimento da resistência do concreto. Estudo Battagin, Battagin e Munhóz (2010).



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Battagin, Battagin e Munhóz (2010).

Estas curvas de crescimento linearizadas foram analisadas individualmente, como apresentado no Anexo N e, através de suas equações, obteve-se os coeficientes de crescimento s_c correspondentes, conforme resumido na Tabela 7.6.

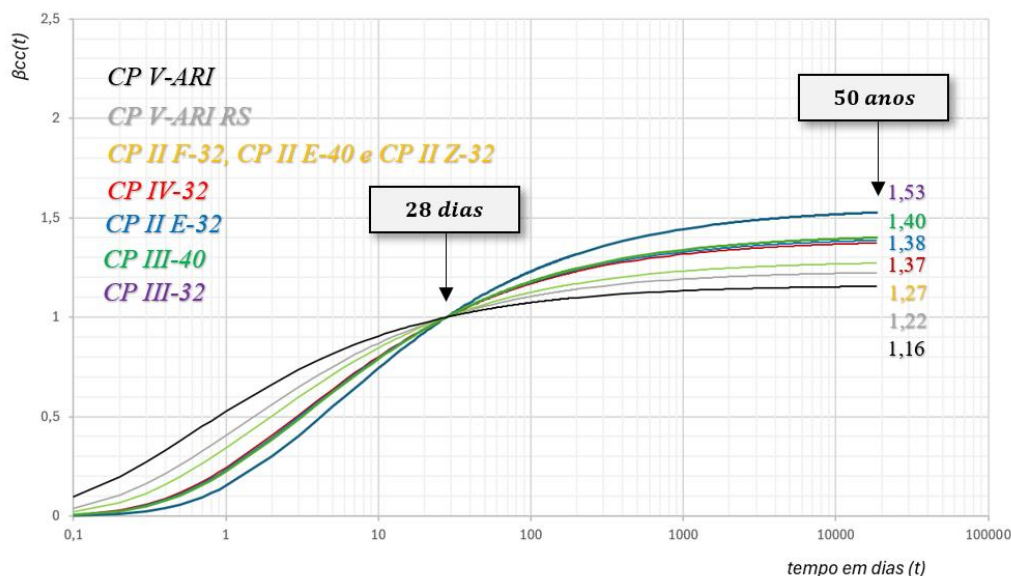
Tabela 7.6 – Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes s_c das curvas de crescimento. Fonte histórica: Battagin, Battagin e Munhóz (2010).

Tipo de cimento	w/c	Equação linear	R ²	s _c
CP II E - 32	0,48	s _c = 1,7884*(w/c) + 0,3487	0,9956	0,34
CP II F - 32	0,48	s _c = 1,3388*(w/c) + 0,2682	0,9800	0,25
CP II E - 40	0,48	s _c = 1,3461*(w/c) + 0,2784	0,9892	0,25
CP II Z - 32	0,48	s _c = 1,3094*(w/c) + 0,2522	0,9908	0,25
CP III - 32	0,48	s _c = 2,3178*(w/c) + 0,4376	0,9993	0,44
CP III - 40	0,48	s _c = 1,8744*(w/c) + 0,3269	0,9972	0,35
CP IV - 32	0,48	s _c = 1,7277*(w/c) + 0,3275	0,9979	0,33
CP V - ARI	0,48	s _c = 0,8056*(w/c) + 0,1548	0,9838	0,15
CP V - ARI RS	0,48	s _c = 1,0971*(w/c) + 0,2234	0,9911	0,21

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 7.12 apresenta as curvas de crescimento relativo de resistência obtidas, conforme apresentado na Tabela 7.6, considerando tipo e classe do cimento utilizado, em todos os casos para uma relação $w/c = 0,48$.

Figura 7.12 - Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão para diferentes tipos de cimento e relação água/cimento $w/c = 0,48$, em todos os casos.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Battagin, Battagin e Munhóz (2010).

Nota-se que os valores médios dos coeficientes de crescimento (s_c) obtidos para os cimentos tipo CP V-ARI, CP II, CP IV e CP III foram de 0,18; 0,27; 0,33 e 0,39 nesta ordem. Tais resultados se aproximaram dos valores preconizados pela ABNT NBR 6118, desde sua versão de 2003 (ABNT, 2003a) e pelo CEB-FIP Model Code 1990 (CEB, 1993), são eles: 0,20, 0,25, 0,25 e 0,38, respectivamente.

Vale registrar que a norma brasileira ABNT NBR 7215 (ABNT, 1996)¹³⁵, americana ASTM C 109/C 109M (ASTM, 2008)¹³⁶ e europeia EN 196-1 (CEN, 1994)¹³⁷ utilizadas para a determinação da resistência à compressão dos diferentes tipos de cimento Portland empregam argamassas produzidas com relações água/cimento de $w/c = 0,48$, $w/c = 0,485$ e $w/c = 0,50$, respectivamente. Tal fato, aliado a proximidade dos resultados obtidos no estudo de Battagin, Battagin e Munhóz (2010), sugere que os coeficientes de crescimento s_c preconizados pela atual norma nacional ABNT NBR 6118:2023 ($0,2 \leq s \leq 0,38$) foram obtidos em estudos que consideravam argamassas produzidas com relação água/cimento entre $0,48 \leq w/c \leq 0,50$, o que corresponde,

¹³⁵ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: Abnt, 1996. 8 p.

¹³⁶ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C109/C109M-08**: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). West Conshohocken: Astm International, 2008. 9 p.

¹³⁷ COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 196-1**: Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength. Brussels: Cen, 1994. 22 p.

aproximadamente, aos índices prescritos no *fib* Model Code 2020 para o concretos de classes de resistência entre C35 e C60, produzidos com cimentos tipo CR e CN, ou seja, $0,2 \leq s_c \leq 0,4$, conforme apresentado na Tabela 4.10 desta dissertação.

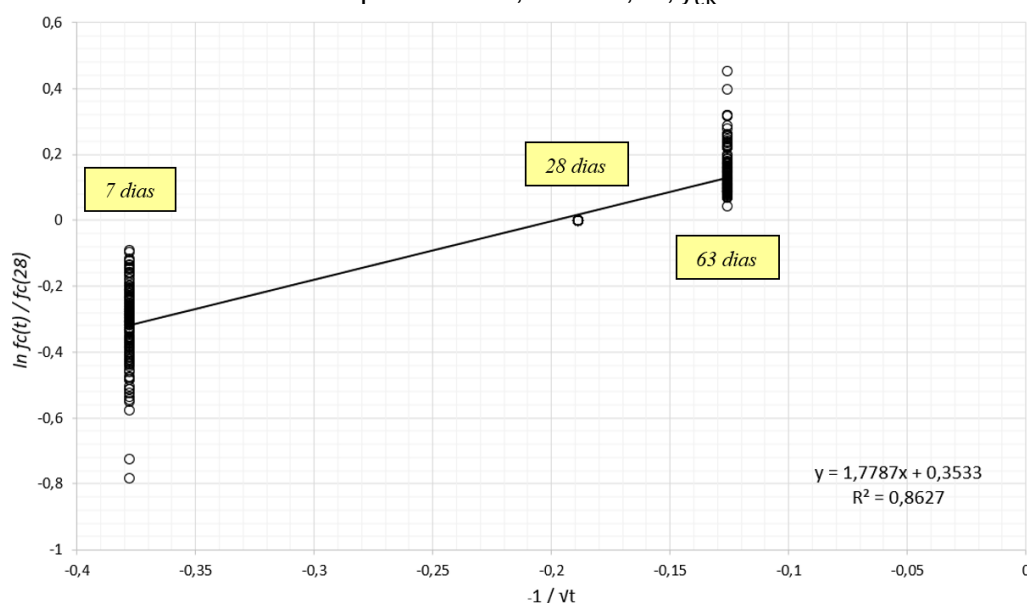
7.5 Fonte atual: Obra A (2013 a 2016)

Esta obra foi executada na cidade de São Paulo entre fevereiro de 2013 e maio de 2016, ou seja, em um período de 40 meses. No total foram analisadas 1.166 amostras de acordo com as diferentes famílias de traços de concreto. Cada amostra é composta por 3 exemplares ensaiados aos 7, 28 e 63 dias de idade.

Para cada amostra analisada foram obtidos 3 resultados de resistência à compressão distintos, um para cada idade. Desta maneira, as 1.166 amostras contemplam 4.662 resultados de resistência para os 4 diferentes traços de concreto produzidos com cimentos tipo CP III 40 (w/c de 0,50; 0,45 e 0,40) e CP V-ARI (w/c de 0,45), como detalhado no Anexo E.

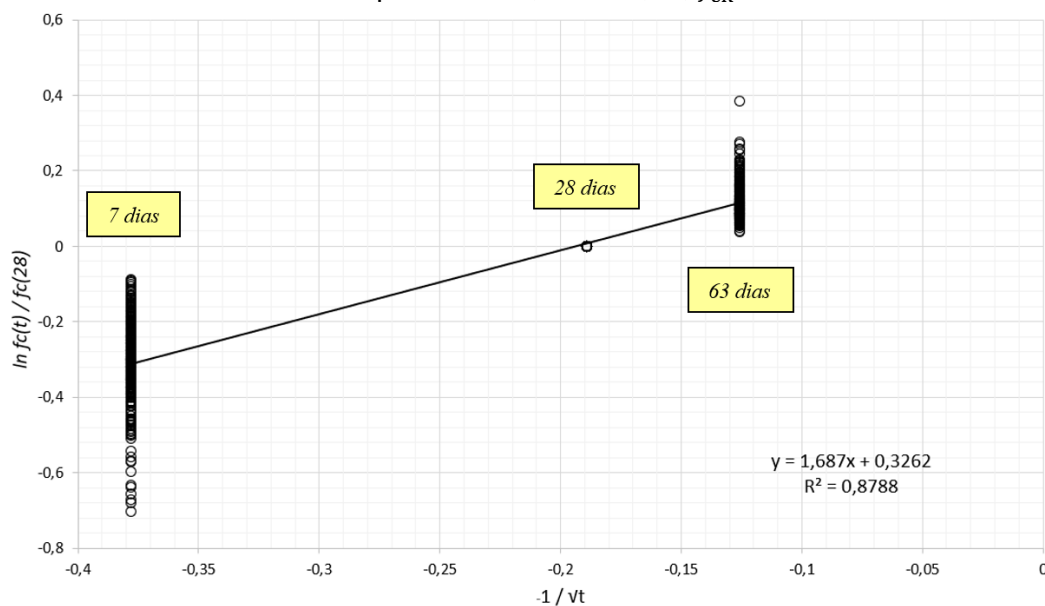
Com base nos dados mencionados no parágrafo anterior foram elaboradas as Figuras 7.13 a 7.16 que apresentam as curvas linearizadas e as equações utilizadas para a determinação dos coeficientes de crescimento (s_c) dos 4 traços de concreto analisados.

Figura 7.13 – Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP III 40, $w/c = 0,50$, $f_{ck} = 35$ MPa.



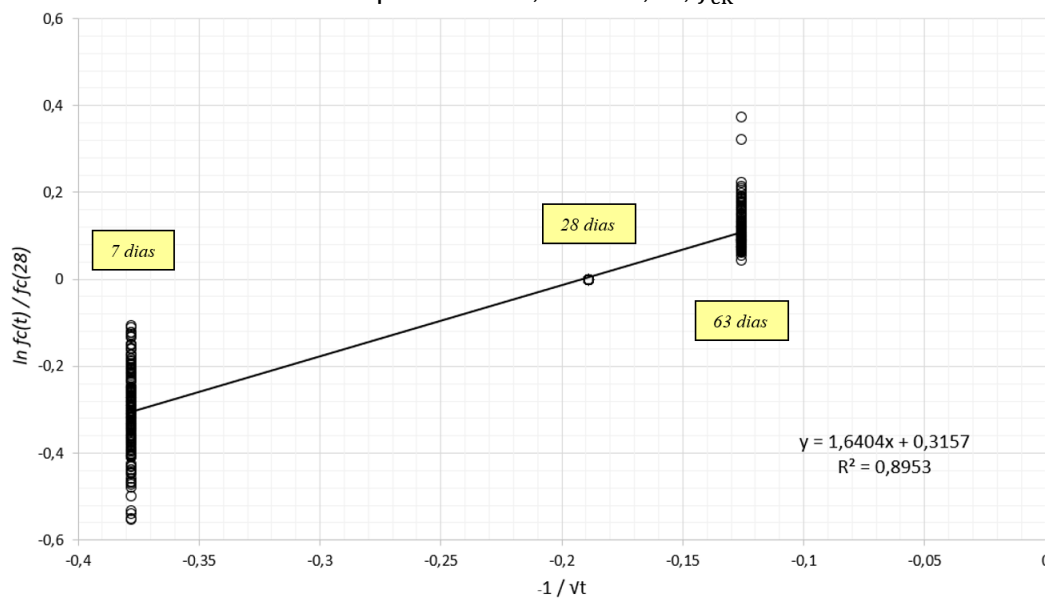
Fonte: Elaborada pelo autor, dados atuais disponibilizados pela PhD Engenharia.

Figura 7.14 – Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP III 40, $w/c = 0,45$, $f_{ck} = 40$ MPa.



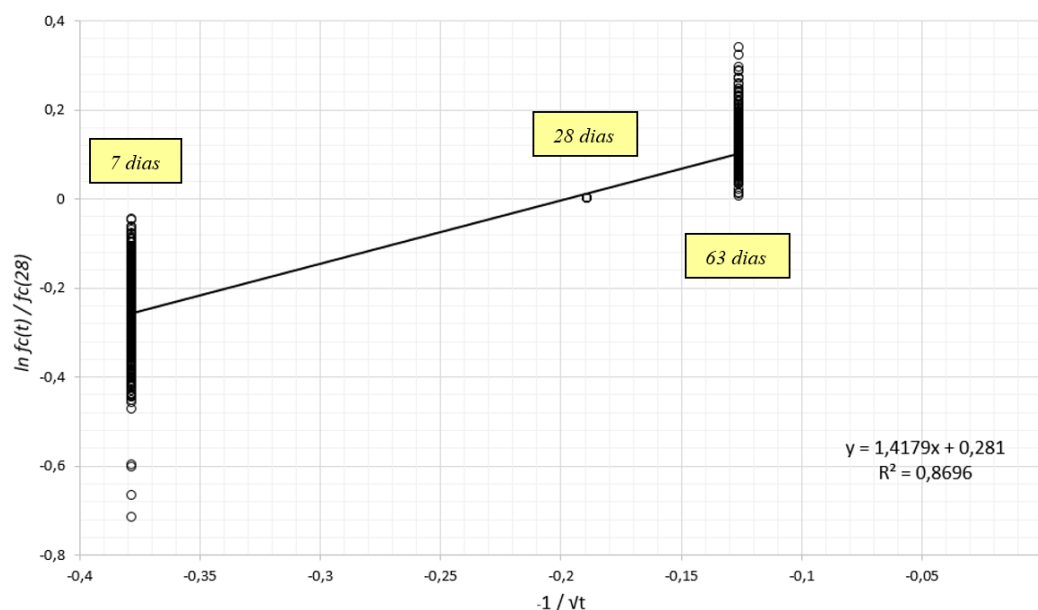
Fonte: Elaborada pelo autor, dados atuais disponibilizados pela PhD Engenharia.

Figura 7.15 – Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP III 40, $w/c = 0,40$, $f_{ck} = 45$ MPa.



Fonte: Elaborada pelo autor, dados atuais disponibilizados pela PhD Engenharia.

Figura 7.16 – Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP V-ARI, $w/c = 0,45$, $f_{ck} = 40$ MPa.



Fonte: Elaborada pelo autor, dados atuais disponibilizados pela PhD Engenharia.

Com base nas equações linearizadas apresentadas nas Figuras 7.13 a 7.16 foi possível encontrar os coeficientes de crescimento da resistência dos concretos produzidos para a Obra A, vide Tabela 7.7.

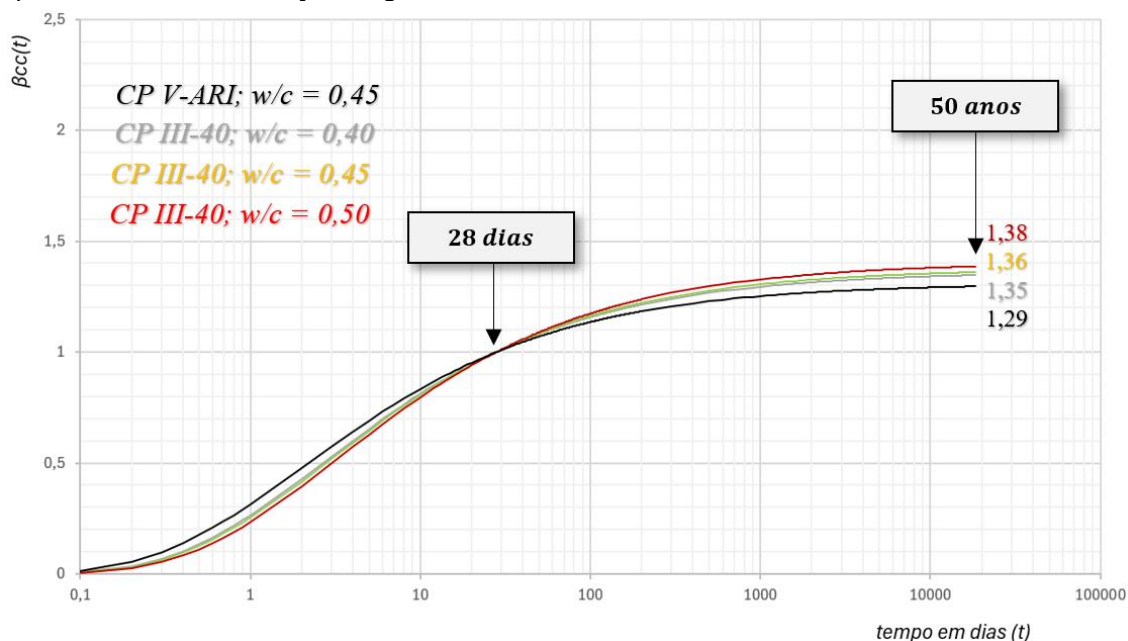
Tabela 7.7 – Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes s_c das curvas de crescimento. Fonte dados atuais: Obra A.

Tipo de cimento	f_{ck} [MPa]	w/c	Equação linear	R^2	s_c
CP III-40	35	0,50	$s_c = 1,7787*(w/c) + 0,3533$	0,8627	0,34
CP III-40	40	0,45	$s_c = 1,6870*(w/c) + 0,3262$	0,8788	0,32
CP III-40	45	0,40	$s_c = 1,6404*(w/c) + 0,3157$	0,8953	0,31
CP V-ARI	40	0,45	$s_c = 1,4179*(w/c) + 0,2810$	0,8696	0,27

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 7.17 apresenta as curvas de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto, de acordo com o tipo e classe do cimento utilizados e as diferentes relações água/cimento (w/c), conforme resultados apresentados na Tabela 7.7.

Figura 7.17 - Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão para diferentes tipos de cimento e relações água/cimento w/c . Obra A.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados atuais. Obra A.

Registra-se que os dados desta Obra A já foram objeto de análise prévia do autor desta dissertação, conforme apresentado em artigo publicado no 62º Congresso Brasileiro do Concreto do IBRACON por Boni, Couto e Helene (2020).

Os resultados obtidos com estes dados permitem estabelecer uma análise comparativa entre os coeficientes de crescimento teóricos preconizados pelo *fib* Model Code 2020 com os coeficientes de crescimento obtidos com resultados de resistência oriundos de um controle de campo. Evidentemente, há de se considerar, que o controle de campo está mais suscetível às variações das operações de ensaio e, portanto, neste caso, maiores imprecisões dos coeficientes de crescimento obtidos são esperadas.

A Tabela 7.8 apresenta a análise comparativa mencionada no parágrafo anterior.

Tabela 7.8 – Obra A. Análise comparativa entre os coeficientes s_c obtidos e os coeficientes s_c preconizados pelo *fib* Model Code 2020.

Tipo de cimento	f_{ck} [MPa]	w/c	Coeficiente s_c de crescimento da resistência obtidos	Coeficiente s_c <i>fib</i> Model Code 2020
CP III 40	35	0,50	0,34	0,5
CP III 40	40	0,45	0,32	0,4
CP III 40	45	0,40	0,31	0,4
CP V-ARI	40	0,45	0,27	0,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que para os concretos produzidos com cimento tipo CP III 40 os coeficientes obtidos no estudo são menores que os preconizados pelo *fib* Model Code 2020 e variam de acordo com a relação w/c . O mesmo não acontece com o concreto produzido com cimento tipo CP V-ARI, onde o coeficiente s_c obtido (0,27) é maior que o preconizado pelo código modelo de norma europeu (0,20).

Vale salientar que todos os coeficientes de crescimento obtidos se encontram dentro dos limites normativos estabelecidos pela norma ABNT NBR 6118:2023 ($0,20 \leq s_c \leq 0,38$). Entretanto, as variações devido à classe de resistência do concreto (ou devido às variações da relação w/c) não estão contempladas na referida norma.

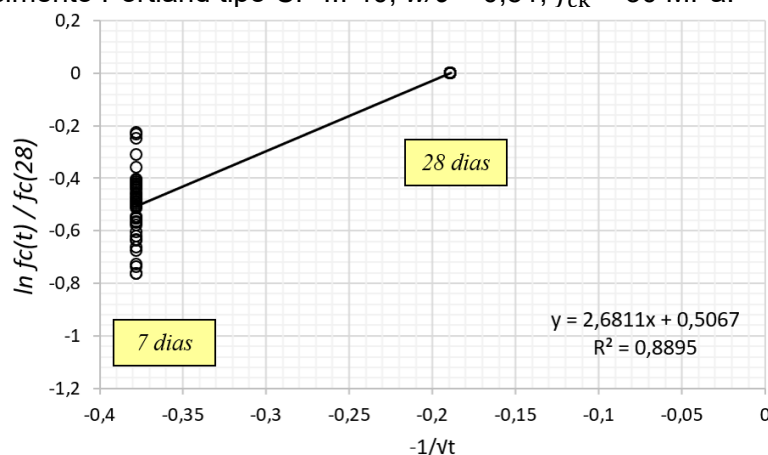
7.6 Fonte atual: Obra B (2017 – 2019)

Obra realizada na cidade de Vitória, ES entre os meses de agosto de 2017 e janeiro de 2019. Os dados referentes a esta obra contemplam 712 resultados de resistência à compressão de concretos com classe de resistência de C30, C35 e C40, todos produzidos com cimento tipo CP III 40 RS e ensaiados aos 7 e 28 dias de idade.

Os traços das 3 diferentes famílias de concreto, assim como os resultados de resistência à compressão e as variáveis obtidas durante os ensaios de controle de aceitação estão apresentados detalhadamente no Anexo F desta dissertação.

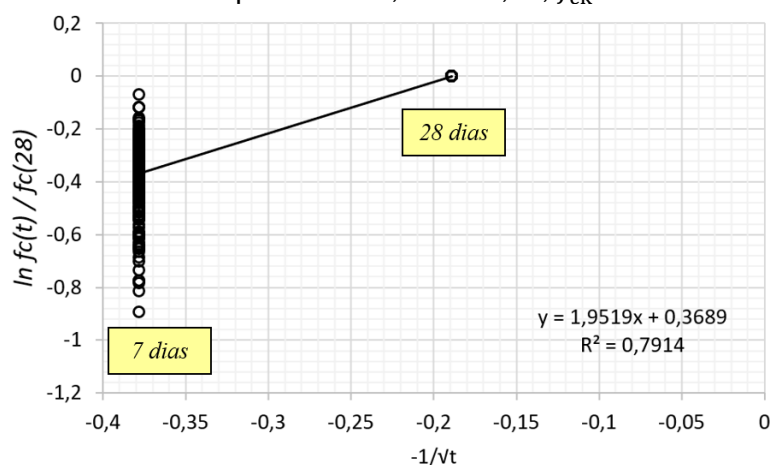
Apresenta-se graficamente nas Figuras 7.18 a 7.20 as curvas linearizadas utilizadas para a determinação dos coeficientes de crescimento (s_c) de concretos produzidos com os cimentos CP III 40 RS com diferentes relações água/cimento (w/c), são elas: 0,51, 0,48 e 0,46.

Figura 7.18 – Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP III 40, $w/c = 0,51$, $f_{ck} = 30$ MPa.



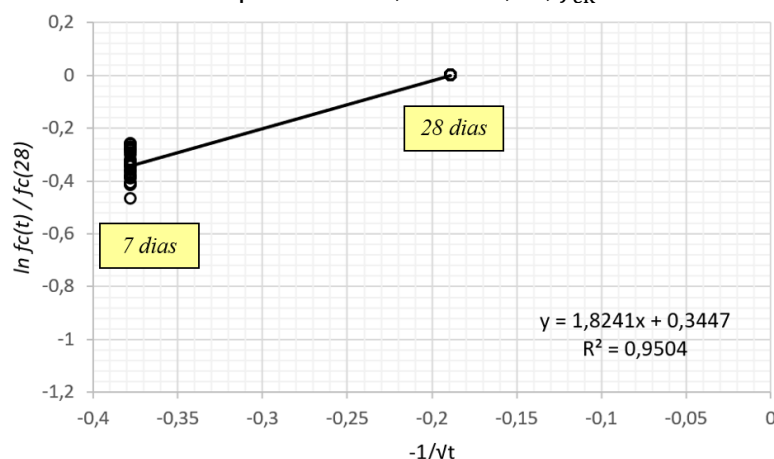
Fonte: Elaborada pelo autor, dados atuais disponibilizados pela PhD Engenharia.

Figura 7.19 – Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP III 40, $w/c = 0,48$, $f_{ck} = 35$ MPa.



Fonte: Elaborada pelo autor, dados atuais disponibilizados pela PhD Engenharia.

Figura 7.20 – Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP III 40, $w/c = 0,46$, $f_{ck} = 40$ MPa.



Fonte: Elaborada pelo autor, dados atuais disponibilizados pela PhD Engenharia.

Com base nas equações linearizadas apresentadas nas Figuras 7.18 a 7.20 foi possível encontrar o coeficiente de crescimento da resistência dos concretos produzidos para a Obra B, conforme apresentado na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 – Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes s_c das curvas de crescimento. Fonte dados atuais: Obra B.

Tipo de cimento	f_{ck} [MPa]	w/c	Equação linear	R^2	s_c
CP III-40 RS	30	0,51	$s_c = 2,6811*(w/c) + 0,5067$	0,8895	0,51
CP III-40 RS	35	0,48	$s_c = 1,9519*(w/c) + 0,3689$	0,7914	0,37
CP III-40 RS	40	0,46	$s_c = 1,8241*(w/c) + 0,3447$	0,9504	0,34

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para melhor entendimento dos resultados apresentados na Tabela 7.9, realizou-se uma análise comparativa entre os valores de s_c obtidos e os preconizados pelo *fib* Model Code 2020, como indicado na Tabela 7.10.

Tabela 7.10 – Obra B. Análise comparativa entre os coeficientes s_c obtidos e os coeficientes s_c preconizados pelo *fib* Model Code 2020.

Tipo de cimento	f_{ck} [MPa]	w/c	Coeficiente s_c de crescimento da resistência obtidos	Coeficiente s_c <i>fib</i> Model Code 2020
CP III-40 RS	30	0,51	0,51	0,5
CP III-40 RS	35	0,48	0,37	0,5
CP III-40 RS	40	0,46	0,34	0,4

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se que os valores dos coeficientes de crescimento s_c obtidos variaram entre $0,34 \leq s_c \leq 0,51$, de acordo com a variação da relação w/c.

Os resultados de s_c obtidos se encontram fora da faixa preconizada pela norma ABNT NBR 6118:2023 ($0,20 \leq s \leq 0,38$) e dentro da faixa estabelecida pelo *fib* Model Code 2020 ($0,1 \leq s_c \leq 0,6$). Neste último caso, especificamente, dentro da faixa de concretos produzidos com cimento de endurecimento normal, CN ($0,3 \leq s_c \leq 0,5$).

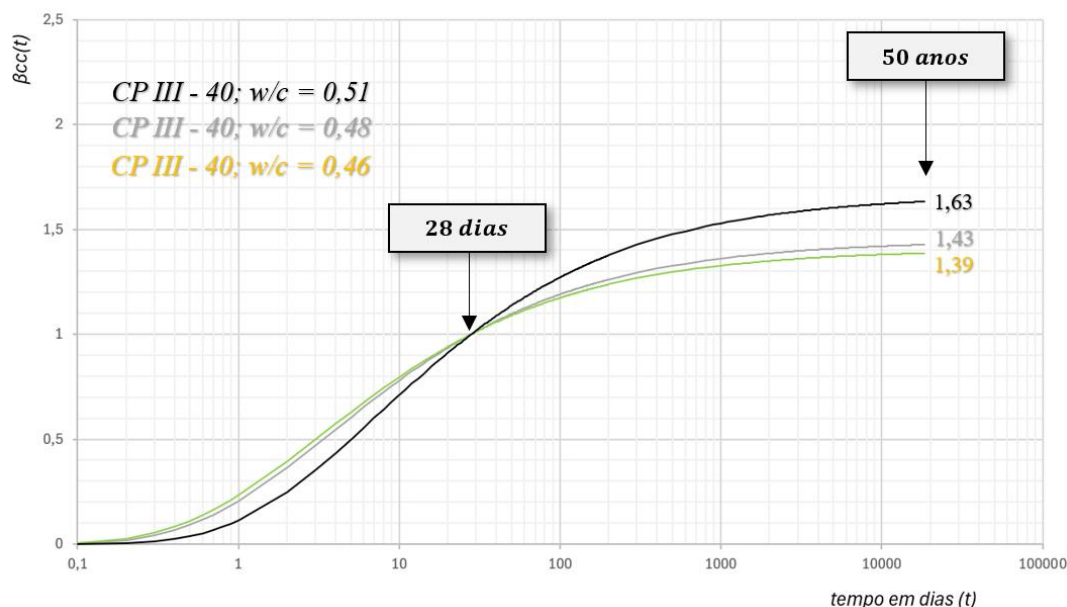
Ainda, nota-se que os resultados referentes aos concretos de classes de resistência C35 e C40 utilizados na Obra B apresentam coeficientes de crescimento um pouco menores que os preconizados pelo *fib* Model Code 2020. Tal fato pode ser explicado pelos seguintes motivos:

- ✓ Maior variabilidade das operações de amostragem, ensaio e controle, quando estes são realizados em campo. Esta questão é abordada no Anexo B (informativo) da norma ABNT NBR 5739:2018 “*Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*” (ABNT, 2018a) e no ACI 214R-11 “*Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete*” (ACI, 2011)¹³⁸. Neste contexto, Helene e Terzian (1992) ainda consideram a variabilidade do processo de produção, como detalhado no *Capítulo 5 “Controle de Aceitação do Concreto”* da referida literatura consagrada sobre o tema.
- ✓ A composição do cimento Portland, uma vez que, de acordo com a norma ABNT NBR 16697:2018 “*Cimento Portland – Requisitos*” (ABNT, 2018b), no caso do cimento tipo CP III 40 RS, permite adição de 35% a 75% de escória granulada de alto forno; 0% a 10% de material carbonático. Sendo que o teor de clínquer pode variar de 25% a 65% (porcentagens em massa).

¹³⁸ AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 214.R-11**: Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete. Farmington Hills: Aci, 2011. 20 p.

A Figura 7.21 apresenta as curvas de crescimento relativo da resistência conforme o tipo e classe do cimento utilizado e as diferentes relações água/cimento (w/c), conforme resultados apresentados na Tabela 7.10.

Figura 7.21 - Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão para diferentes tipos de cimento e relações água/cimento w/c . Obra B.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados atuais. Obra B.

Os valores do crescimento relativo da resistência em idades avançadas ($f_{c(50 \text{ anos})} / f_{c(28)}$) assumiu valores entre $1,39 \leq f_{c(50 \text{ anos})} / f_{c(28)} \leq 1,63$.

7.7 Fonte atual: Obra C (2018 – 2020)

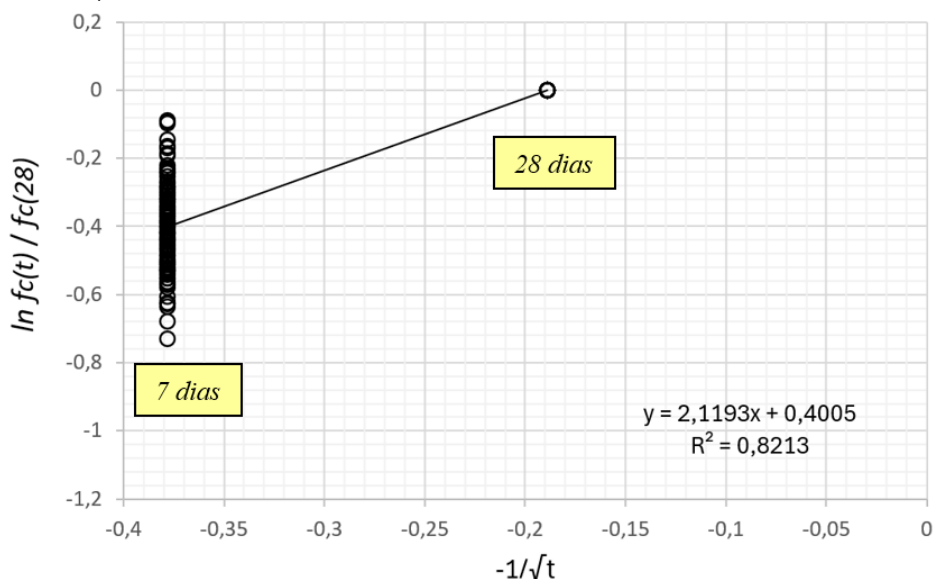
Esta obra está localizada na cidade de São Paulo e foi executada entre setembro de 2018 e fevereiro de 2020, ou seja durante um período de 17 meses. Neste caso foram utilizados concretos de classe de resistência C30, C40 e C50, todos produzidos com cimento tipo CP II E 40.

No total foram analisados 1.084 resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade. Registra-se que estes dados já foram objeto de análise prévia do autor desta dissertação, conforme registrado em artigo publicado no 65º Congresso Brasileiro do Concreto do IBRACON por Boni e Helene (2024).

Os resultados de resistência à compressão e as variáveis obtidas durante os ensaios de controle de aceitação estão apresentados detalhadamente no Anexo G desta dissertação.

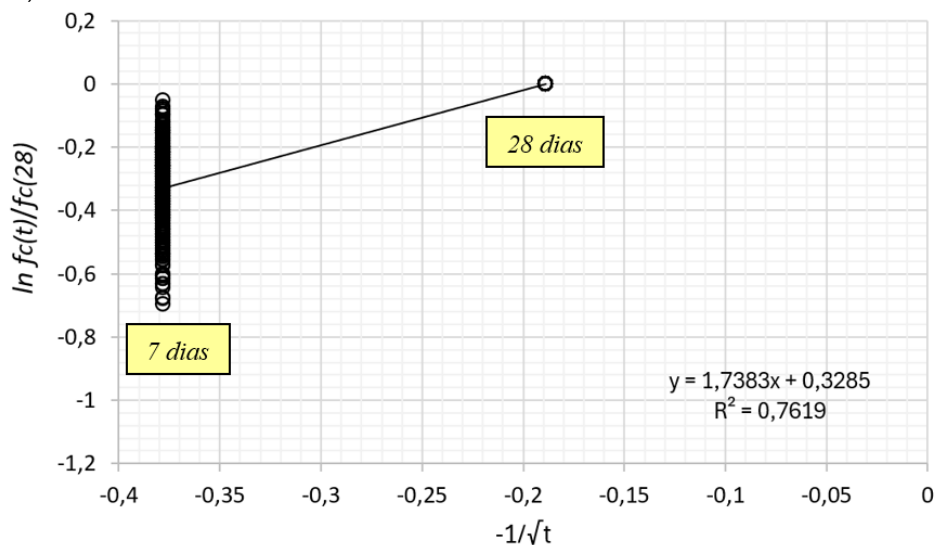
As Figuras 7.22 a 7.24 apresentam as expressões linearizadas obtidas por meio de resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade (vide Anexo G) para concretos produzidos com cimento CP II E 40 e relações w/c de 0,55, 0,45 e 0,40.

Figura 7.22 – Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com de cimento Portland tipo CP II E - 40, classe de resistência C30, $w/c = 0,55$.



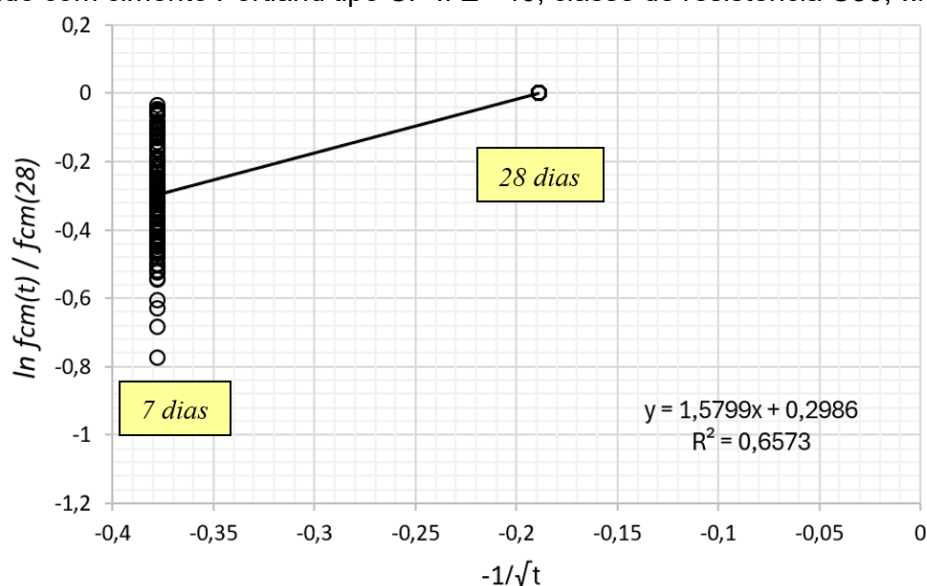
Fonte: Elaborada pelo autor, dados atuais disponibilizados pela PhD Engenharia.

Figura 7.23 – Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP II E - 40, classe de resistência C40, $w/c = 0,45$.



Fonte: Elaborada pelo autor, dados atuais disponibilizados pela PhD Engenharia.

Figura 7.24 – Representação linear da curva de crescimento da resistência do concreto produzido com cimento Portland tipo CP II E - 40, classe de resistência C50, $w/c = 0,40$.



Fonte: Elaborada pelo autor, dados atuais disponibilizados pela PhD Engenharia.

Com base nas equações linearizadas apresentadas nas Figuras 7.22 a 7.24 foi possível encontrar os coeficientes de crescimento da resistência dos concretos produzidos para a Obra C, como resumido na Tabela 7.11.

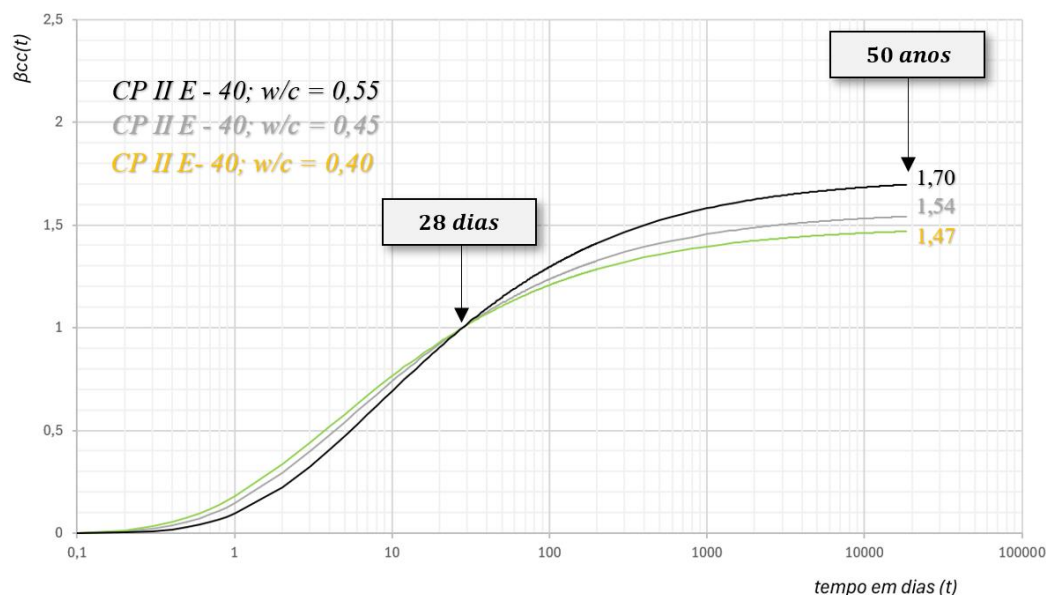
Tabela 7.11 – Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes s_c das curvas de crescimento. Fonte dados atuais: Obra C.

Tipo de cimento	f_{ck} [MPa]	w/c	Equação linear	R^2	s_c
CP II E 40	30	0,55	$s_c = 2,119*(w/c) + 0,4005$	0,8213	0,40
CP II E 40	40	0,45	$s_c = 1,738*(w/c) + 0,3285$	0,7619	0,33
CP II E 40	50	0,40	$s_c = 1,579*(w/c) + 0,2986$	0,6573	0,30

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 7.25 apresenta graficamente o desenvolvimento da resistência à compressão ao longo do tempo para os 3 traços de concreto analisados na Obra C.

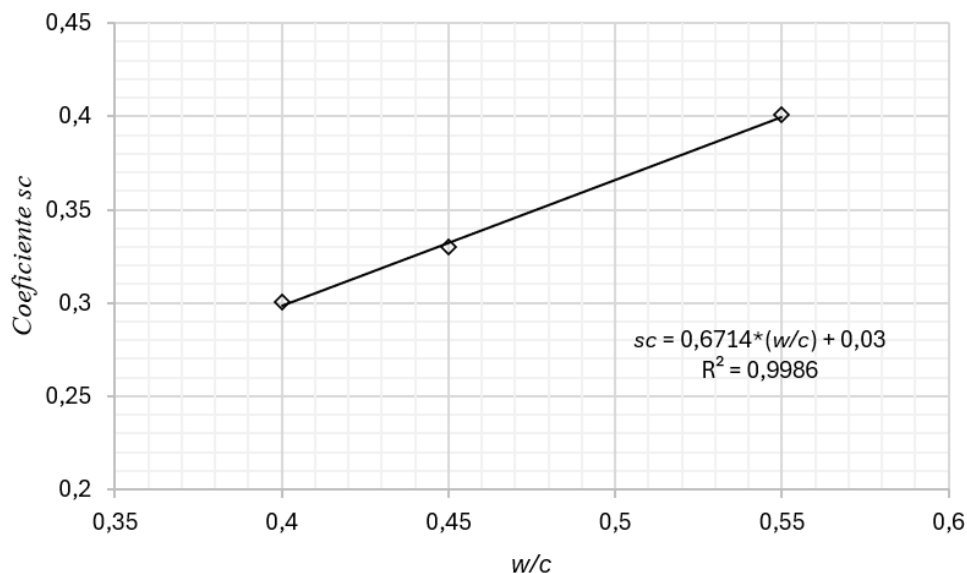
Figura 7.25 – Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão para diferentes tipos de cimento e relações água/cimento w/c . Obra C.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados atuais. Obra C.

A Figura 7.26 apresenta graficamente a variação do coeficiente de crescimento s_c em função da relação água/cimento (w/c). Nota-se que esta variação, assim como nos estudos anteriores, muito se aproxima de uma equação linear ($R^2 = 0,9986$).

Figura 7.26 – Coeficiente s_c em função da relação água/cimento (w/c) para concretos produzidos com cimentos CP II-40. Obra C.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos dados apresentados na Tabela 7.11. Obra C.

Os valores dos coeficientes de crescimento s_c obtidos variaram entre $0,30 \leq s_c \leq 0,40$ e se encontram muito próximos da faixa preconizada pela norma ABNT NBR

6118:2023 ($0,20 \leq s \leq 0,38$). Entretanto, os valores se encontram acima do valor preconizado pela mesma norma para o CP II ($s = 0,25$).

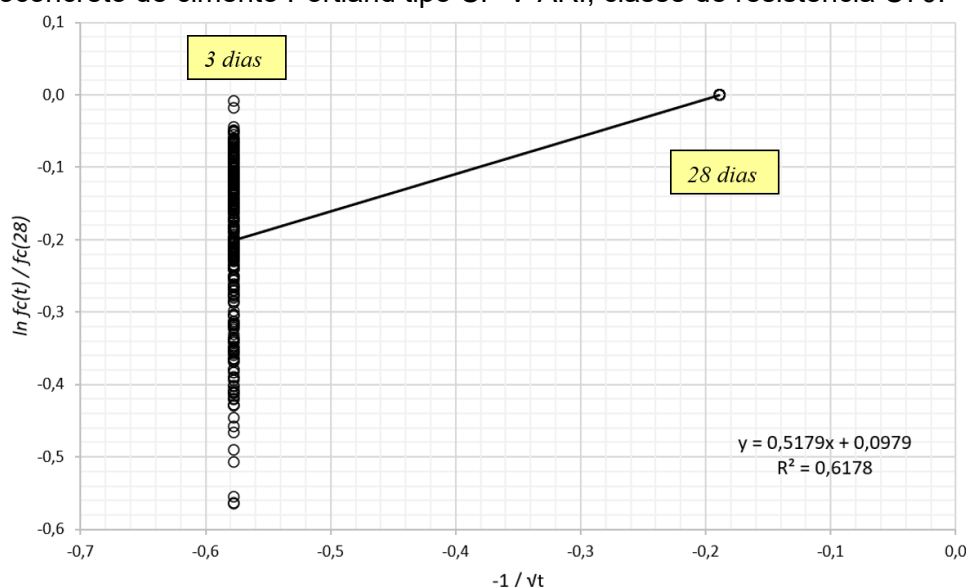
Quando os valores de s_c obtidos são analisados à luz do *fib* Model Code 2020, estes se encontram dentro da faixa preconizada ($0,1 \leq s_c \leq 0,6$) e, neste caso, dentro da faixa de concretos produzidos com cimento de endurecimento normal, CN ($0,3 \leq s_c \leq 0,5$).

7.8 Fonte atual: Obra D (2015 – 2016)

Trata-se de obra de reforço estrutural executada no Distrito Federal entre junho de 2015 e agosto de 2016. O material utilizado foi um microconcreto industrializado, de base cimentícia, de elevado desempenho e alta resistência inicial, classe de resistência C70.

Na Figura 7.27 apresenta-se a equação linearizada obtida considerando 556 resultados de resistência à compressão aos 3 e 28 dias de idade, oriundos do controle de aceitação realizado em canteiro de obra, vide Anexo H.

Figura 7.27 – Representação linear da curva de crescimento da resistência do microconcreto de cimento Portland tipo CP V-ARI, classe de resistência C70.

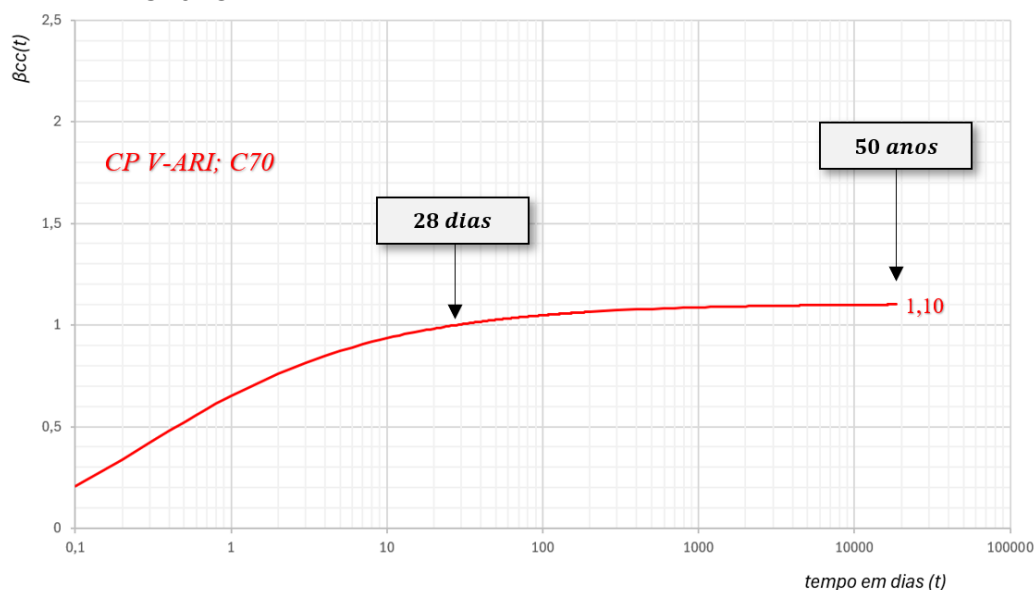


Fonte: Elaborada pelo autor, dados atuais disponibilizados pela PhD Engenharia.

Com base na análise da equação da Figura 7.27, nota-se que: $s_c = \frac{0,5179}{\sqrt{28}} = 0,10$.

Sendo assim, a Figura 7.28 apresenta a curva de crescimento da resistência à compressão do microconcreto C70.

Figura 7.28 - Curva de crescimento relativo da resistência para um microconcreto, classe de resistência C70. Obra D.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados atuais. Obra D.

A análise dos dados da Obra D contemplou apenas o concreto de uma classe de resistência (C70). Logo, neste caso, não é possível realizar análises comparativas, como nos estudos anteriores. Entretanto, observa-se que o resultado do coeficiente teórico de crescimento obtido ($s_c = 0,10$) está coerente com o preconizado pelo *fib* Model Code 2020, considerando um cimento de endurecimento rápido (CR) e um concreto com resistência à compressão superior a 60 MPa.

7.9 Resumo e análise conjunta dos resultados

Neste subitem estão compilados os resultados dos coeficientes de crescimento da resistência s_c obtidos nesta dissertação, considerando os *dados históricos* e *atuais*, oriundos de ensaios realizados em ambiente de laboratório e de campo, respectivamente.

Restringindo-se aos limites da relação água/cimento prescritos pelas atuais normas ABNT NBR 6118:2023, ABNT NBR 12655:2022 e EN 206:2013, apresenta-se inicialmente os resultados de s_c obtidos de traços estudados com relações $w/c \leq 0,65$. Ainda, para melhor entendimento, optou-se por apresentar estes resultados separadamente, considerando os ensaios laboratoriais (*dados históricos*) e os ensaios de campo (*dados atuais*).

A Tabela 7.12 apresenta o resumo dos resultados referentes aos *dados históricos*, ou seja, estudos laboratoriais apresentados nos subitens 7.1 a 7.4 deste capítulo.

Tabela 7.12 – Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes de crescimento da resistência à compressão s_c , para concretos de $w/c \leq 0,65$. Ensaios laboratoriais.

Fonte	Tipo de Cimento	Coeficiente s_c							
		Relação w/c							
		0,38	0,45	0,48	0,50	0,55	0,58	0,60	0,65
Amaral Filho (1939 a 1943)	CP I – Fábrica A	nihil	nihil	nihil	0,41	nihil	nihil	0,49	nihil
	CP I – Fábrica S	nihil	nihil	nihil	0,33	nihil	nihil	0,38	nihil
	CP I – Fábrica D	nihil	nihil	nihil	0,33	nihil	nihil	0,37	nihil
Tango (1957 a 1979)	CP I – Marca A	nihil	0,41	nihil	nihil	0,47	nihil	nihil	0,53
	CP I – Marca B	nihil	0,31	nihil	nihil	0,36	nihil	nihil	0,43
	CP I – Marca C	nihil	0,35	nihil	nihil	0,40	nihil	nihil	0,46
Helene (1987)	CP I (CP 32)	0,30	nihil	0,34	nihil	nihil	0,42	nihil	nihil
	CP IV (POZ 32)	0,34	nihil	0,36	nihil	nihil	0,44	nihil	nihil
	CP III (AF 32)	0,47	nihil	0,50	nihil	nihil	0,61	nihil	nihil
	CP I (CP 25)	0,34	nihil	0,37	nihil	nihil	0,44	nihil	nihil
	CP IV (POZ 25)	0,40	nihil	0,56	nihil	nihil	0,63	nihil	nihil
	CP III (AF 25)	0,51	nihil	0,55	nihil	nihil	0,64	nihil	nihil
Battagin, Battagin e Munhóz. (2010)	CP II E - 32	nihil	nihil	0,34	nihil	nihil	nihil	nihil	nihil
	CP II F - 32	nihil	nihil	0,25	nihil	nihil	nihil	nihil	nihil
	CP II E - 40	nihil	nihil	0,25	nihil	nihil	nihil	nihil	nihil
	CP II Z - 32	nihil	nihil	0,25	nihil	nihil	nihil	nihil	nihil
	CP III - 32	nihil	nihil	0,44	nihil	nihil	nihil	nihil	nihil
	CP III - 40	nihil	nihil	0,35	nihil	nihil	nihil	nihil	nihil
	CP IV - 32	nihil	nihil	0,33	nihil	nihil	nihil	nihil	nihil
	CP V - ARI	nihil	nihil	0,15	nihil	nihil	nihil	nihil	nihil
	CP V – ARI RS	nihil	nihil	0,21	nihil	nihil	nihil	nihil	nihil

Fonte: Elaborada pelo autor.

Analogamente, a Tabela 7.13 apresenta o resumo dos resultados referentes aos *dados atuais*, obtidos em estudos experimentais de campo, como detalhado nos subitens 7.5 a 7.8 deste capítulo.

Tabela 7.13 – Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes de crescimento da resistência à compressão s_c , para concretos de $w/c \leq 0,65$. Ensaios de campo.

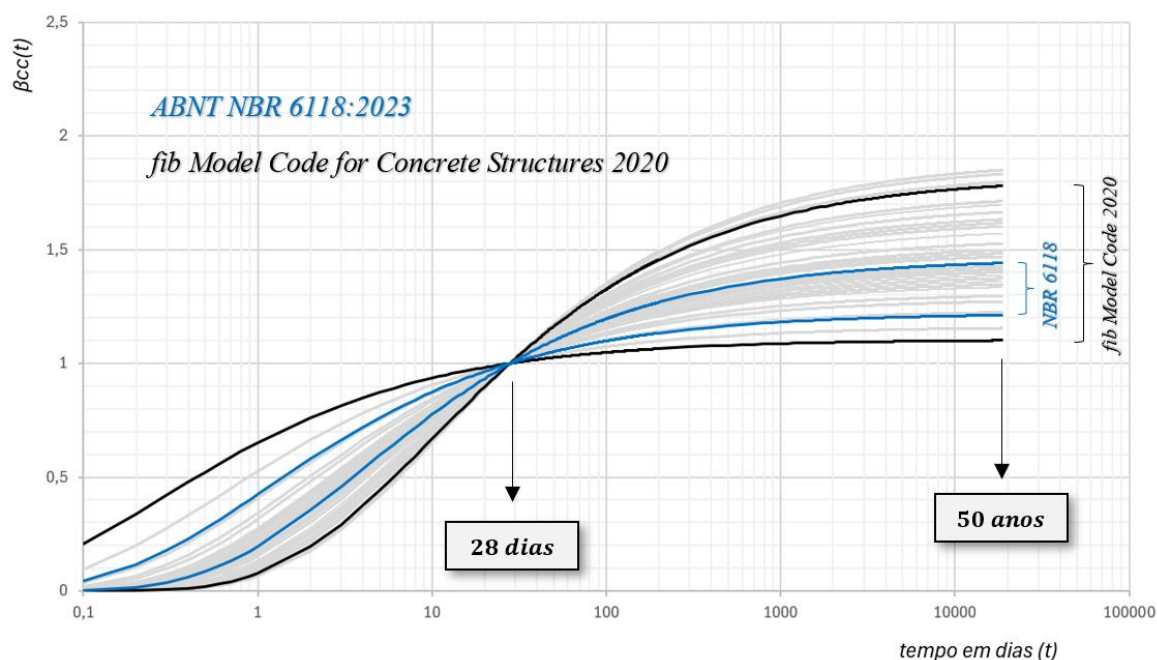
Fonte	Tipo de Cimento	Coeficiente s_c							
		Relação w/c							
		0,35	0,40	0,45	0,46	0,48	0,50	0,51	0,55
Obra A (2013 a 2016)	CP III - 40	nihil	0,31	0,32	nihil	nihil	0,34	nihil	nihil
	CP V - ARI	nihil	nihil	0,27	nihil	nihil	nihil	nihil	nihil
Obra B (2017 a 2019)	CP III - 40	nihil	nihil	nihil	0,34	0,37	nihil	0,51	nihil
Obra C (2018 a 2020)	CP II E - 40	nihil	0,30	0,33	nihil	nihil	nihil	nihil	0,40
Obra D (2015 a 2016)	CP IV ARI	0,10	nihil	nihil	nihil	nihil	nihil	nihil	nihil

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se por meio da análise das Tabelas 7.12 e 7.13 que os coeficientes de crescimento obtidos variaram entre $0,10 \leq s_c \leq 0,64$, ou seja, fora dos limites preconizados pelo modelo ABNT NBR 6118:2013 ($0,20 \leq s_c \leq 0,38$) e aderidos aos limites do modelo *fib* Model Code 2020 ($0,10 \leq s_c \leq 0,60$).

Para melhor visualização, a Figura 7.29 apresenta graficamente as envoltórias dos modelos preconizados nas normas supracitadas, assim como o desenvolvimento das curvas de crescimento da resistência dos concretos produzidos com relações água/cimento $0,35 \leq w/c \leq 0,65$, considerando os *dados históricos* e *atuais* obtidos no estudo experimental desta dissertação.

Figura 7.29 - Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão para $0,35 \leq w/c \leq 0,65$ obtidas nesta dissertação e limites ABNT NBR 6118:2023 e *fib* Model Code 2020.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos resultados apresentados nas Tabelas 7.12 e 7.13.

Do ponto de vista da sustentabilidade e na opinião deste autor o limite superior de $w/c \leq 0,65$ atualmente estabelecido pelas normas brasileira e europeia deveria ser revisto. Desta maneira, optou-se também por apresentar nesta dissertação estudos de resistência à compressão que utilizaram traços de concreto de relações $0,65 < w/c < 0,80$.

Neste contexto, a Tabela 7.14 apresenta o resumo dos resultados de s_c obtidos referentes aos *dados históricos* (subitens 7.1 a 7.3 deste capítulo) que utilizaram concretos produzidos com relações $w/c > 0,65$.

Tabela 7.14 – Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes de crescimento da resistência à compressão s_c , para concretos de $w/c > 0,65$. Ensaio laboratoriais.

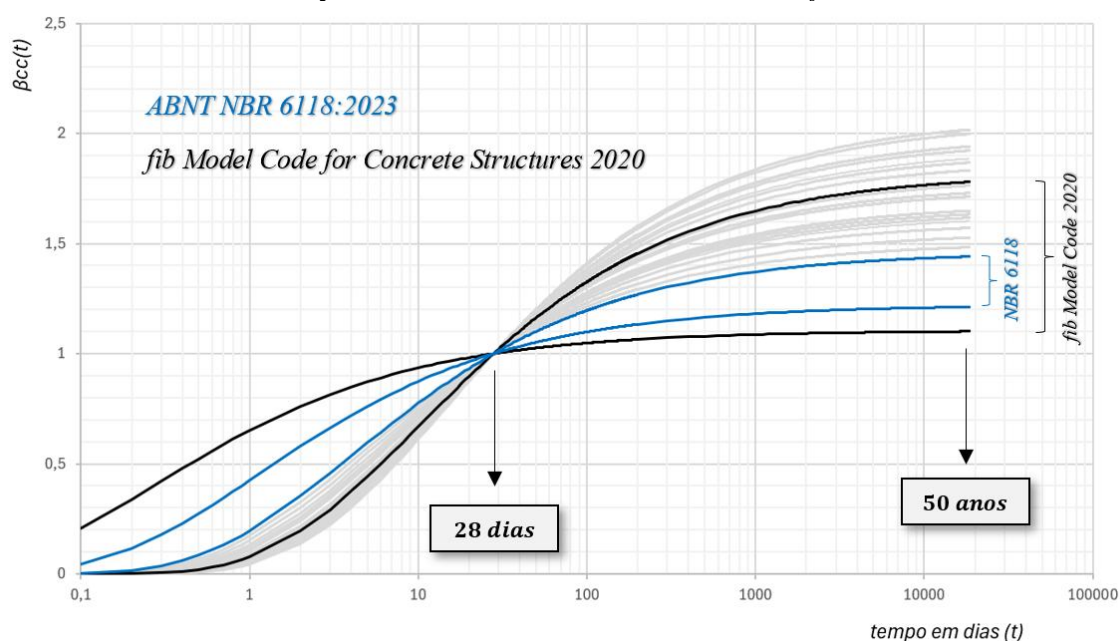
Fonte	Tipo de Cimento	Coeficiente s_c				
		Relação w/c				
		0,68	0,70	0,75	0,78	0,80
Amaral Filho (1939 a 1943)	CP I – Fábrica A	nihil	0,56	nihil	nihil	0,63
	CP I – Fábrica S	nihil	0,41	nihil	nihil	0,47
	CP I – Fábrica D	nihil	0,44	nihil	nihil	0,50
Tango (1957 a 1979)	CP I – Marca A	nihil	nihil	0,57	nihil	nihil
	CP I – Marca B	nihil	nihil	0,51	nihil	nihil
	CP I – Marca C	nihil	nihil	0,50	nihil	nihil
Helene (1987)	CP I (CP 32)	0,49	nihil	nihil	0,52	nihil
	CP IV (POZ 32)	0,52	nihil	nihil	0,59	nihil
	CP III (AF 32)	0,66	nihil	nihil	0,73	nihil
	CP I (CP 25)	0,52	nihil	nihil	0,56	nihil
	CP IV (POZ 25)	0,69	nihil	nihil	0,72	nihil
	CP III (AF 25)	0,65	nihil	nihil	0,68	nihil

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se por meio da análise da Tabela 7.14 que os coeficientes de crescimento obtidos variaram entre $0,41 \leq s_c \leq 0,73$, ou seja, fora dos limites preconizados pelo modelo ABNT NBR 6118:2013 ($0,20 \leq s_c \leq 0,38$) e oscilando em torno do limite superior do modelo *fib* Model Code 2020 ($0,10 \leq s_c \leq 0,60$).

A Figura 7.30 apresenta graficamente as envoltórias dos modelos ABNT NBR 6118:2023 e *fib* Model Code 2020, assim como o desenvolvimento das curvas de crescimento da resistência para relações água/cimento de $0,65 < w/c < 0,80$.

Figura 7.30 - Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão para $0,65 < w/c < 0,80$ obtidas nesta dissertação e limites ABNT NBR 6118:2023 e *fib* Model Code 2020.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base nos resultados apresentados na Tabela 7.14.

Para finalizar este subitem, analisa-se, à luz do modelo de crescimento proposto pelo *fib* Model Code 2020, algumas das correlações de resistência apresentadas no Capítulo 2 desta dissertação, são elas: Petrucci (1968), modelo FRANCE (1983) e modelo ABNT (1989).

As equações teóricas adotadas pelos 3 modelos mencionados no parágrafo anterior permitem que, de maneira aproximada, sejam determinados os coeficientes de crescimento s_c correspondentes. Para tanto, utiliza-se a Equação 6.2 obtida a partir do código modelo europeu, conforme detalhado no subitem 6.2 “*Metodologia de Análise das curvas de crescimento da resistência*”.

$$s_c = - \ln \frac{f_{c(7)}}{f_{c(28)}} \quad (6.2)$$

A Tabela 7.15 apresenta o resumo dos resultados obtidos.

Tabela 7.15 – Coeficientes de crescimento s_c obtidos a partir da Equação 6.2 para 3 diferentes modelos teóricos.

Modelo Teórico	Equações Teóricas	para $t = 7$ dias	$s_c = - \ln \frac{f_{c(7)}}{f_{c(28)}}$
Petrucci (1968)	$f_{c(28)} = 1,30 * f_{c(7)}$	$f_{c(7)} = 0,77 * f_{c(28)}$	0,26 *
	$f_{c(28)} = 1,50 * f_{c(7)}$	$f_{c(7)} = 0,67 * f_{c(28)}$	0,40 *
FRANCE (1983)	$f_{c(t)} = 0,685 * f_{c(28)} * \lg(t + 1)$	$f_{c(7)} = 0,62 * f_{c(28)}$	0,48 *
ABNT (1989)	$\frac{f_{c(t)}}{f_{c(28)}} = \frac{13,259 * t * (t + 42)}{(9 * t + 40) * (t + 61)}$	$f_{c(7)} = 0,65 * f_{c(28)}$	0,43 *

(*) valores aproximados determinados por meio da correlação de resistências aos 7 e 28 dias de idade (vide Equação 6.2).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se que os modelos analisados de maneira simplificada também se localizam dentro da faixa preconizada pelo *fib* Model Code 2020 ($0,10 \leq s_c \leq 0,60$) e fora da faixa adotada pela ABNT NBR 6118:2023 ($0,20 \leq s \leq 0,38$), com a ressalva de que nenhum destes 3 modelos leva em consideração a variação do coeficiente de crescimento obtido em função do tipo de cimento e da relação w/c .

7.10 Análise do efeito combinado do crescimento e do decréscimo da resistência

Com base nos resultados de s_c listados no subitem anterior para $w/c \leq 0,65$ (Tabelas 7.12 e 7.13), apresenta-se a seguir uma análise da influência da carga

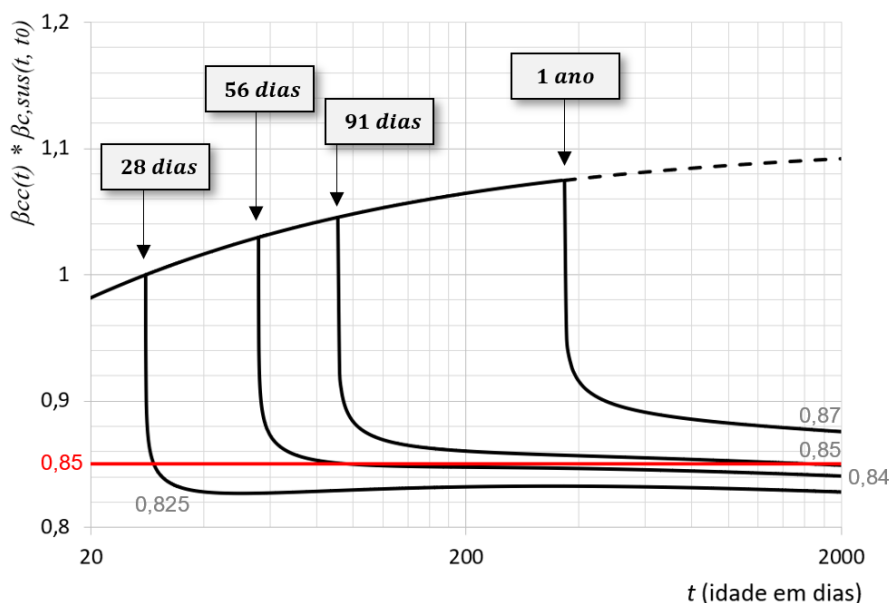
elevada e mantida no desenvolvimento das curvas de resistência. Para tanto, utilizar-se-á o modelo teórico de decréscimo da resistência proposto pelo *fib* Model Code 2020 aplicado às curvas de crescimento obtidas, ou seja, utilizando o produto das funções de crescimento e decréscimo da resistência: $\beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0)$.

O código modelo de norma europeu *fib* Model Code 2020, assim como o Eurocode 2:2023 “*Design of concrete structures*” (CEN, 2023) representam o produto $\beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0)$ pelas siglas α_{cc} e k_{tc} , respectivamente. Em ambos os casos este produto pode assumir valores iguais a 0,85 ou 1,00, a depender das características do concreto utilizado e da data de aplicação da carga. Já a norma brasileira ABNT NBR 6118:2023 não associa este produto a nenhuma sigla, resumindo a associá-lo a um valor empírico de 0,85. Detalhes sobre este assunto estão apresentados no subitem 5.2 “*Coeficiente redutor da resistência de cálculo do concreto (α_{cc})*” desta dissertação.

Dada a quantidade de curvas de crescimento obtidas neste estudo para $w/c \leq 0,65$, optou-se por analisar suas envoltórias, ou seja, as curvas com coeficientes de crescimento iguais a $s_c = 0,10$ e $s_c = 0,64$.

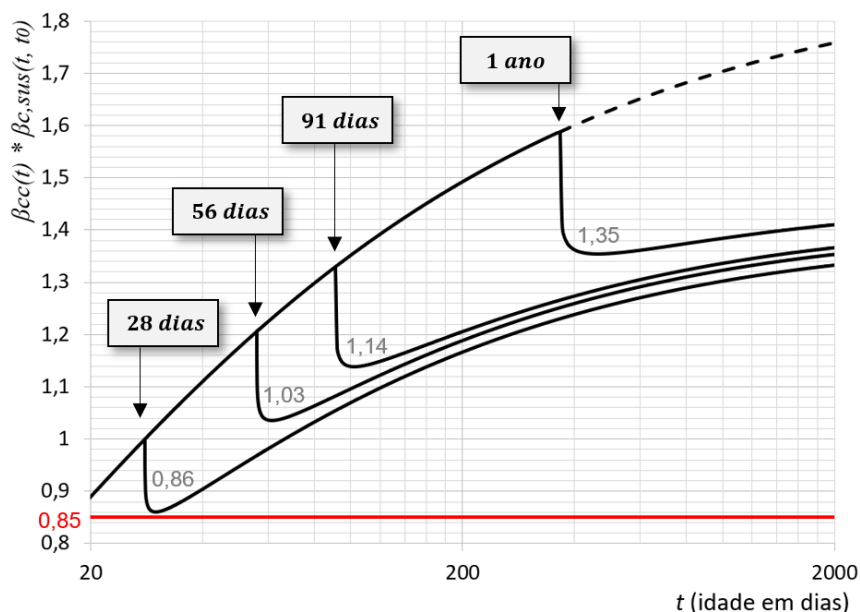
Sendo assim, as Figuras 7.31 e 7.32 apresentam o efeito combinado do crescimento e do decréscimo da resistência considerando os valores de coeficientes mencionados no parágrafo anterior, $t_{ref} = 28$ dias e carga elevada e mantida aplicadas em diferentes idades (t_0): 28, 56, 91, 365 dias.

Figura 7.31 – O efeito da carga mantida aplicada aos 28, 56, 91 e 365 dias de idade em curva de crescimento de coeficiente $s_c = 0,10$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 7.32 – O efeito da carga mantida aplicada aos 28, 56, 91 e 365 dias de idade em curva de crescimento de coeficiente $s_c = 0,64$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se que para concretos com $s_c = 0,10$, o coeficiente redutor da resistência de cálculo do concreto é inferior a 0,85, assumindo valor mínimo de 0,825 para carga elevada mantida e aplicada aos 28 dias de idade ($t_0 = 28$ dias). Enquanto, para concretos com $s_c = 0,64$, o coeficiente redutor atinge um valor mínimo de 0,86.

A Tabela 7.16 apresenta os valores mínimos do produto $\alpha_{cc} = \beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0)$, para $t_{ref} = 28$ dias e diferentes datas de aplicação de carga elevada mantida (t_0): 28, 56, 91 e 365 dias.

Tabela 7.16 - Valores mínimos de α_{cc} para $t_{ref} = 28$ dias, t_0 variando de 28 a 365 dias e para diferentes coeficientes ($0,10 \leq s_c \leq 0,64$).

t_0 [dias]	s_c						
	0,10 *	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,64 **
28	0,825	0,84	0,85	0,85	0,86	0,86	0,86
56	0,84	0,89	0,92	0,96	0,99	1,02	1,03
91	0,85	0,91	0,96	1,01	1,06	1,12	1,14
365	0,87	0,95	1,04	1,13	1,22	1,31	1,35

(*) Valores apresentados graficamente na Figura 7.31.

(**) Valores apresentados graficamente na Figura 7.32.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Sabe-se que, de maneira geral as primeiras cargas são aplicadas em uma estrutura alguns meses após sua conclusão, principalmente no caso de fundações e pilares de edificações. Ocorre que, nesse ínterim, a resistência do concreto aumenta devido à hidratação contínua do cimento. Portanto, entende-se que o valor do coeficiente redutor da resistência de cálculo do concreto não deve ser entendido como

um valor fixo, atualmente igual a $0,85 * f_{cd}$ (como adotado pela ABNT NBR 6118:2023) ou igual a $0,85 * f_{cd}$ ou $1,00 * f_{cd}$ (no caso do *fib* Model Code 2020 e Eurocode 2).

Nesta dissertação propõe-se que seja adotado para o coeficiente redutor da resistência de cálculo do concreto um valor variável que depende da classe de resistência do concreto, tipo de cimento utilizado e da data de aplicação da carga na estrutura, ou seja, recomenda-se adotar o valor mínimo do produto:

$$\alpha_{cc} = \beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0) \quad (5.7)$$

Observa-se que, de maneira geral, concretos de alta resistência ($f_{ck} \geq 60$ MPa), de baixa relação água/cimento ($w/c \leq 0,40$), produzidos com cimentos de alta resistência inicial (CR), carregados em idades precoces ($7 \text{ dias} \leq t_0 \leq 28 \text{ dias}$) podem resultar em valores mínimos do produto $\beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0)$ inferiores ao valor preconizado pelas normas ABNT NBR 6118, Eurocode 2 e *fib* Model Code 2020 ($\alpha_{cc} = 0,85$).

Registra-se que Helene (1993) abordou este assunto tendo como referência as expressões preconizadas pelo CEB-FIP Model Code 1990 (CEB, 1993). Recentemente, em artigo publicado no International *fib* Symposium on Conceptual Design of Structures na cidade do Rio de Janeiro em 2025, Boni, Silva e Helene (2025) trataram do mesmo assunto, tendo como referência as expressões atuais propostas pelo *fib* Model Code 2020 (FIB, 2023).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 Conclusões propriamente ditas

O crescimento da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo pode ser representado por meio de modelos teóricos de comportamento. Estes, por sua vez, levam em consideração coeficientes de crescimento que assumem valores distintos, que variam dentro de certos limites, a depender das características do cimento Portland e da relação w/c do concreto.

Neste contexto, atualmente, destaca-se o modelo europeu, recentemente publicado no *fib* Model Code for Concrete Structures 2020, no Eurocode 2:2023 e utilizado como referência nesta dissertação, dada sua abrangência, semelhança e influência no modelo nacional adotado pela atual ABNT NBR 6118.

Nesta dissertação, por meio da análise de aproximadamente 20.000 resultados de resistência à compressão de concretos produzidos no Brasil desde o ano de 1939, com todos os tipos de cimento nacionais (CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V) e diferentes relações água/cimento ($0,35 \leq w/c \leq 0,80$) foram obtidos, à luz do modelo teórico europeu, coeficientes de crescimento s_c variando de 0,10 a 0,73.

Sendo assim, a primeira conclusão deste estudo experimental diz respeito aos valores dos coeficientes de crescimento obtidos (s_c). Observa-se que estes estão aderidos aos limites teóricos preconizados pelo *fib* Model Code 2020 ($0,1 \leq s_c \leq 0,6$), principalmente quando comparados aos resultados de s_c obtidos por meio de análise dos traços com relação $w/c \leq 0,65$ (atual limite para os concretos estruturais segundo a norma ABNT NBR 6118:2023). Neste caso, os valores do coeficiente de crescimento obtidos (s_c) variaram entre 0,10 e 0,64, ou seja, com muita aderência aos limites de 0,1 e 0,6 do texto do *fib* Model Code for Concrete Structures 2020 e Eurocode 2:2023.

Os resultados experimentais também indicaram que os valores do coeficiente de crescimento variam em função da relação w/c . Mais do que isso, observou-se experimentalmente que o coeficiente de crescimento s_c variou linear e proporcionalmente com a relação w/c , mantidas as demais características do traço. Esta é mais uma contribuição importante e original desta dissertação.

Em decorrência do longo período de análise de dados, mediante estudo específico dos coeficientes de crescimento dos concretos amassados com cimento

Portland comum (CP I), sem adições, foi possível observar que os resultados experimentais apontaram uma tendência à diminuição dos valores do coeficiente de crescimento da resistência (s_c) ao longo do tempo. Tal fato não significa que concretos produzidos com cimentos mais atuais são mais resistentes e duráveis.

Este fato significa que os concretos produzidos com cimentos mais recentes tendem a apresentar um crescimento relativo da resistência mais acelerado nas primeiras idades. Isso pode ser explicado devido a moagem mais fina dos cimentos atuais, uma vez que sua composição química, assim como as proporções dos principais compostos continuam praticamente as mesmas.

O *fib* Model Code 2020 também apresenta um modelo teórico para representar o decréscimo da resistência à compressão em decorrência do efeito da carga elevada e mantida (efeito Rüschi) que leva em conta a maturidade do concreto e a data de aplicação da carga.

O produto das funções de crescimento e decréscimo da resistência adotadas pelo código de norma europeu resulta em valores variáveis ao longo do tempo, a depender, principalmente, da dinâmica das reações de hidratação do cimento e da data de aplicação da carga elevada mantida.

Conforme discutido nesta dissertação, o resultado do produto dessas funções de crescimento e de decréscimo da resistência [$\beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0)$] é utilizado na determinação do coeficiente redutor da resistência de cálculo (α_{cc}).

Ocorre que tanto as normas europeias (*fib* Model Code 2020 e Eurocode 2:2023), assim como a norma nacional (ABNT NBR 6118:2023), adotam valores fixos para este coeficiente ($\alpha_{cc} = 0,85$ ou $\alpha_{cc} = 1,00$).

Esta premissa pode levar a projetos e, conseqüentemente, estruturas de concreto conservadoras, antieconômicas e não sustentáveis, principalmente quando são empregados concretos com cimentos chamados lentos (CS, tipo CP III com alto teor de escória ou CP IV).

Por outro lado, ao empregar concretos produzidos com cimentos chamados rápidos (CR, tipo CP V-ARI), de alta resistência inicial, as resistências de projeto (f_{cd}) e as estruturas decorrentes obtidas pelos coeficientes fixos, em certos casos, ficam temerárias e contra a segurança.

Nas condições analisadas nesta dissertação o coeficiente redutor da resistência de cálculo assumiu valores variáveis de $\alpha_{cc} = 0,825$ a $\alpha_{cc} = 1,35$ ou seja, o produto efetivo das equações consagradas de aumento da resistência com o tempo

e de redução pelo efeito da carga mantida, varia numa faixa bem superior aos valores fixos de 0,85 e 1,00, atualmente adotados nas normas citadas nesta dissertação.

Desta maneira, nesta dissertação procurou-se apresentar uma metodologia alternativa, mais exata, para a definição do valor a ser adotado como resistência de projeto (f_{cd}). Utilizando os modelos consagrados de comportamento da resistência à compressão propõem-se aqui a utilização do produto $\beta_{cc}(t) * \beta_{c,sus}(t, t_0)$ em substituição aos valores fixos atualmente adotados.

Trabalhos científicos tais como o apresentado pelo Prof. Paulo Helene em seminário do 65º Congresso Brasileiro do Concreto, em outubro de 2024, denominado “*Por que projetar com f_{ck} a 63 dias. EN 1992-1-1. MC 2020*” têm demonstrado as vantagens ambientais inequívocas de projetar estruturas de concreto submetidas a controle em idades de referência superiores a 28 dias, assim como demonstrado as consequências diretas do valor adotado como de projeto, f_{cd} , na emissão de gases tipo estufa da estrutura como um todo. Portanto precisões maiores no cálculo do f_{cd} , tal qual discutido nesta dissertação, podem gerar benefícios ambientais significativos sem alterar a segurança atualmente convencionada nas atuais normas de referência.

Portanto, com base nos resultados aqui apresentados, pretende-se fomentar a discussão sobre o coeficiente redutor utilizado atualmente, assim como as vantagens em adotar o controle da resistência à compressão do concreto em idades mais avançadas que os atuais 28 dias, no que se refere à segurança estrutural e questões ambientais envolvidas.

8.2 Sugestões à normalização nacional

Registra-se que os 20.000 resultados de resistência à compressão analisados nesta dissertação são oriundos de concretos produzidos com cimentos nacionais, por centrais dosadoras nacionais associadas à ABESC, controlados por laboratórios nacionais pertencentes à RBLE do INMETRO, aplicados em obras nacionais ou ainda, objeto de estudo de renomados pesquisadores brasileiros. Desta maneira, tanto os *dados históricos* como os *dados atuais* analisados neste estudo experimental estão inseridos no contexto nacional.

Pretende-se então com este estudo contribuir com a atualização dos coeficientes de crescimento da resistência à compressão (s) considerados pela norma

ABNT NBR 6118:2023, em seu subitem 12.3.3 “*Resistência de cálculo do concreto*”, que atualmente adota valores de 0,20 para concreto de cimento CP III e IV; 0,25 para concreto de cimento CP I e CP II e 0,38 para concreto de cimento CP V-ARI, sem levar em conta a classe de resistência do concreto (ou sua relação w/c) e a influência da temperatura, nem a efetiva e real faixa mais ampla de variabilidade que vai de 0,10 a 0,73, conforme demonstrado.

Se mantida a restrição de relação w/c máxima de 0,65 (ABNT NBR 6118), sugere-se que os valores dos coeficientes de crescimento a serem adotados variem entre $0,10 \leq s \leq 0,64$, para concretos de classes de resistência C20 a C90. Se alterada a relação w/c de cimentos estruturais para máximo de 0,80, sugere-se que os valores dos coeficientes de crescimento a serem adotados variem entre $0,10 \leq s \leq 0,73$, para concretos de classes de resistência C20 a C90.

8.3 Transferência do conhecimento ao meio técnico e científico

Em maio de 2025 no International *fib* Symposium on Conceptual Design of Structures foi publicado por este autor um artigo técnico denominado “*An alternative method for Calculating concrete design compressive strength, f_{cd}* ”. Inclusive o artigo foi selecionado para apresentação oral em sessão coordenada pelo Prof. György L. Balázs da Budapest University of Technology and Economics. Na oportunidade profícuas discussões sobre o tema foram realizadas.

Em julho de 2024 foi submetido também por este autor um artigo técnico que considera as curvas de crescimento do concreto discutidas nesta dissertação à Revista Científica “*Hormigón y Acero*”, renomada publicação periódica europeia da Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). O artigo já foi aprovado para publicação e se encontra atualmente no *status avance online*.

Ainda, 3 outros artigos sobre o tema já foram publicados e apresentados pelo autor para a comunidade técnica nacional, por ocasião de Congressos Brasileiros do Concreto promovidos anualmente pelo IBRACON, são eles:

- ✓ Artigo denominado “*O desenvolvimento da resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos nacionais à luz do modelo proposto pela*

norma europeia” publicado e apresentado pelo autor no 62° Congresso Brasileiro do Concreto, em setembro de 2020.

- ✓ Artigo denominado “*O desenvolvimento da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo de acordo com o modelo proposto pelo ACI. Apresentação, estudo e análise comparativa com o modelo ABNT*” publicado e apresentado pelo autor no 63° Congresso Brasileiro do Concreto, em outubro de 2022.
- ✓ Artigo denominado “*Evolução da resistência à compressão do concreto segundo a ABNT NBR 6118:2023; fib Model Code 2020 e Eurocode 2: 2023*” publicado e apresentado pelo autor no 65° Congresso Brasileiro do Concreto, em outubro de 2024.

Desta maneira, pretende-se transmitir ao meio técnico os conhecimentos obtidos nesta dissertação dando continuidade à publicação de artigos técnicos, apresentações, palestras e seminários sobre o tema, bem como contribuições à normalização nacional.

8.4 Continuidade de estudo do tema

Parece evidente, razoável e de fácil comprovação experimental, que cargas acima de 75% da carga rápida de ruptura, efetivamente reduzem a resistência à compressão do concreto, comparativamente ao resultado obtido no ensaio rápido ou instantâneo de poucos minutos ou até de menos de minuto.

Por outro lado, ainda existem dúvidas sobre o real significado de tensões elevadas para ocorrência do fenômeno de redução da resistência por efeito de carga mantida, na medida que nas condições normais de projeto e de operação das estruturas de concreto as tensões máximas de trabalho não superam os 50% da tensão de ruptura ou também chamada de resistência à compressão.

Então sugere-se, para continuidade dos estudos, pesquisar melhor o efeito deletério das cargas de longa duração comparativamente às cargas ou tensões de trabalho das estruturas.

Quem sabe no futuro seja possível dispensar a consideração de decréscimo da resistência à compressão do concreto devido a cargas “elevadas” de longa duração,

que provavelmente nunca ocorrem nas estruturas convencionais e trabalhar com f_{cd} maiores sem comprometer a segurança, mas com responsabilidade, grandes benefícios econômicos e ambientais.

REFERÊNCIAS

ABRAMS, Duff A.. Design of Concrete Mixtures. **Structural Materials Research Laboratory Lewis Institute**, Chicago, v. 1, n. 1, p. 1-20, maio 1919.

AÏTCIN, Pierre-Claude. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Pini, 2000. 667 p. Tradução de: Geraldo G. Serra.

AMARAL FILHO, Epaminondas Melo do.. Estudo da previsão da resistência à compressão dos concretos. **Revista Politécnica**, São Paulo, n. 146, p. 345-354, mai. 1945.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 116R-00**: Cement and Concrete Terminology. Farmington Hills: ACI, 2000. 73 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 209.2R-92**: Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures. Farmington Hills: Aci, 1992. 43 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 209.2R-08**: Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete. Farmington Hills: Aci, 2008. 43 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 214.R-11**: Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete. Farmington Hills: Aci, 2011. 20 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-14**: Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills: Aci, 2014. 520 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C109/C109M-08**: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). West Conshohocken: Astm International, 2008. 9 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C150/C150M-19a**: Standard Specification for Portland Cement. West Conshohocken: Astm International, 2019. 10 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1074-11**: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. West Conshohocken: Astm International, 2011. 10 p.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira; TUTIKIAN, Bernardo F. Resistência Mecânica do Concreto. In: TUTIKIAN, Bernardo; PACHECO, Fernanda; ISAÍÁ, Geraldo; BATTAGIN, Inês (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2022. Cap. 17. p. 699-738.

ASPDIN, Joseph. **Artificial Stone**.. UK n. 5022. Depósito: out. 1824. Concessão: dez. 1824.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **EB - 1**: Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro: Abnt, 1937. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: Abnt, 2015a. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Abnt, 2018a. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: Abnt, 2023. 242 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: Abnt, 2003a. 170 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7197**: Projeto de estruturas de concreto protendido. Rio de Janeiro: Abnt, 1989. 71 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: Abnt, 1996. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-1**: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro: Abnt, 2015b. 27 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro: Abnt, 2003b. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: Abnt, 2015c. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: Abnt, 2022. 22 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: Abnt, 2018b. 12 p.

BATTAGIN, Arnaldo Forti; BATTAGIN, Inês Laranjeira da Silva; MUNHÓZ, Flávio André da Cunha. A evolução da normalização e de algumas propriedades dos cimentos Portland brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, Fortaleza. **Anais do 52 CBC2018**. Fortaleza: Ibracon, 2010. p. 1-16.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão; BIRINDELLI, Lucy I. Olivan; DAMINELI, Bruno Luís. ENSAIOS ACELERADOS PARA PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO. In: BAUER, L. A. Falcão. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2025. Cap. 12. p. 272-288.

BAUER, L. A. Falcão; NORONHA, Maria Aparecida de Azevedo; SILVA, Turibio José da; MOTTA, Leila Aparecida de Castro. DOSAGEM DO CONCRETO. In: BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2025. Cap. 6. p. 125-170.

BOGUE, R. H.. Calculation of the Compounds in Portland Cement. **Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition**, [S.L.], v. 1, n. 4, p. 192-197, out. 1929. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ac50068a006>.

BONI, Ricardo; BRITEZ, Carlos; HELENE, Paulo. Controle da resistência à compressão do concreto: análise comparativa entre os procedimentos propostos pela abnt, aci e en. estudo de caso. **Revista Alconpat**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 333-346, 31 ago. 2018. Alconpat Internacional. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.303>.

BONI, Ricardo; COUTO, Douglas; HELENE, Paulo. O desenvolvimento da resistência à compressão do concreto produzidos com cimentos nacionais à luz do modelo proposto pela norma europeia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 62., 2020, Florianópolis. **Anais do 62 CBC**. Florianópolis: Ibracon, 2020. p. 1-16.

BONI, Ricardo; HELENE, Paulo. O desenvolvimento da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo de acordo com o modelo proposto pelo ACI. Apresentação, estudo e análise comparativa com o modelo ABNT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 63., 2022, Brasília. **Anais do 63 CBC**. Brasília: Ibracon, 2022. p. 1-16.

BONI, Ricardo; HELENE, Paulo. Evolução da resistência à compressão do concreto segundo a ABNT NBR 6118:2023; fib Model Code 2020 e Eurocode 2: 2023. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 65., 2024, Maceió. **Anais do 65 CBC**. Maceió: Ibracon, 2024. p. 1-15.

BONI, Ricardo; SILVA, Rafael; HELENE, Paulo. An alternative method for calculating concrete design compressive strength, fcd. In: INTERNATIONAL FIB SYMPOSIUM, 2025, Rio de Janeiro. **Conceptual design of Structures**. Rio de Janeiro: Fédération Internationale de Béton, 2025. p. 234-241.

BRANSON, D. E.; CHRISTIASON, M. L.. Time Dependent Concrete Properties Related to Design-Strength and Elastic Properties, Creep, and Shrinkage. **Symposium Paper ACI**, Detroit, v. 1971, n. 27, p. 257-278, 1 jan. 1971.

BROUWERS, H. J. H.. **A Hydration Model of Portland Cement**: using the work of powers and brownyard. Eindhoven: Tu/e, 2011. 154 p.

BULLARD, Jeffrey W.; JENNINGS, Hamlin M.; LIVINGSTON, Richard A.; NONAT, Andre; SCHERER, George W.; SCHWEITZER, Jeffrey S.; SCRIVENER, Karen L.; THOMAS, Jeffrey J.. Mechanisms of cement hydration. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 41, n. 12, p. 1208-1223, dez. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>.

CAMPITELI, Vicente C.. **Porosidade do Concreto**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, 1987. 15 p. BT - PCC 09/87.

CÁNOVAS, Manuel Fernández. **Hormigón**. 3. ed. Madrid: Rugarte, S. L., 1993. 543 p.

CARINO, N. J.; LEW, H. S. The Maturity Method: from theory to application. **ASCE Structures Congress** 2001. pp. 1-19. Washington, D.C., 2001. ISBN 978-0- 7844-0558-1.

CARLSON, Roy W.. Results of Recent Cement Research and Their Partial Application. **Journal Of The Franklin Institute**: Devoted to Science and the Mechanic Arts, Cambridge, v. 224, n. 1, p. 1-18, jul. 1937.

CEMENT Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050. Carbon emissions reductions up to 2050. 2010. World Business Council for Sustainable Development. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/cement-technology-roadmap-carbon-emissions-reductions-up-to-2050>. Acesso em: 19 set. 2024.

CHEN, X.; WU, S.; ZHOU, J.. Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 40, p. 869-874, mar. 2013. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072>.

CHEUNG, Andrés Batista; BECK, André Teófilo; STUCCHI, Fernando Rebouças; NÓBREGA, Petrus Gorgônio Bulhões da; SANTOS, Sergio Hampshire de Carvalho. Ações e Segurança. In: KIMURA, Alio Ernesto; PARSEKIAN, Guilherme Aris; ALMEIDA, Luiz Carlos de; SANTOS, Sergio Hampshire de Carvalho; BITTENCOURT, Túlio Nogueira (ed.). **Estruturas de Concreto Armado**: volume 1. São Paulo: Ibracon/Abece, 2022. Cap. 4. p. 231-299.

CINCOTTO, Maria A. Reações de Hidratação e Pozolânicas. In: TUTIKIAN, Bernardo; PACHECO, Fernanda; ISAÍÁ, Geraldo; BATTAGIN, Inês (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2022. Cap. 11. p. 451-484.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 196-1**: Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength. Brussels: Cen, 1994. 22 p.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 197-1**: Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels: Cen, 2000. 29 p.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 206**: Concrete - Specification, performance, production and conformity. Brussels: Cen, 2013. 102 p.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 1992-1-1**: Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Brussels, Cen, 2023. 402 p.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. **1990**: CEB-FIP MODEL CODE 1990 DESIGN CODE. Lausanne: CEB-FIP, 1993. 437 p.

COSTA, C.; CARVALHO, P. Almeida de; BORDADO, J. C.; NUNES, A.. Estudo de Argamassas de base cimentícia por microscopia eletrônica de varrimento. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, Lisboa, v. 21, n. 3/4, p. 31-35, jul. 2009.

COUTINHO, A. de Souza. **FABRICO E PROPRIEDADES DO BETÃO**: volume i. 4. ed. Lisboa: Lnec, 2006. 401 p.

COUTO, D.; CARVALHO, M.; CINTRA, A.; HELENE, P.. Concrete structures. Contribution to the safety assessment of existing structures. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 365-389, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952015000300007>.

CREMONINI, Ruy Alberto. **Análise de estruturas acabadas**: contribuição para a determinação da relação entre as resistências potencial e efetiva do concreto. 1994. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil da Epusp, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

CUNHA, José Celso da; ANGELO, Ana Margarida Viera. Contribuição para a determinação da resistência do concreto na análise de estruturas periciadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÃO E PERÍCIAS, 12., 2003, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: Ibape, 2003. p. 1-15.

EPD: DECLARAÇÃO CLIMÁTICA PARA O CIMENTO. 2016. Disponível em: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/5d379720-4109-4bdc-b9b1-c3369dfd968a/Data>. Acesso em: 27 abr. 2024.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **2010**: Fib Model Code for Concrete Structures 2010. Lausanne: FIB, 2013. 402 p.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **2020**: Fib Model Code for Concrete Structures (2020). Lausanne: FIB, 2023. 780 p.

FRANCE. Cahier Des Clauses Techniques Générales nº BAEL 83, de 7 de outubro de 1983. **Règles Techniques de Conception Et de Calcul Des Ouvrages Et Constructions em Béton Armé Suivant La Méthode Des États-Limites**. Paris.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Estruturas de Concreto**: fundamentos do projeto estrutural. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1976. 298 p.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Tecnologia do Concreto Estrutural**: tópicos aplicados. São Paulo: Pini, 2008. 179 p.

FUSCO, Péricles Brasiliense. Controle da resistência do Concreto. **Abece Informa**, São Paulo, v. 16, n. 89, p. 12-19, jan. 2012. Bimestral.

FUSCO, Péricles Brasiliense; ONISHI, Minoru. **Introdução à engenharia de estruturas de concreto**. São Paulo: Cengage, 2017. 264 p.

GARDNER, N. J.; LOCKMAN, M. J.. Design Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal-Strength Concrete. **Aci Materials Journal**, [S.L.], v. 98, n. 2, p. 159-167, 2001. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/10199>.

GUIMARÃES, Flávio. **O encadeamento da indústria do cimento no Brasil**. 2022. ABCP. Disponível em: <https://abcp.org.br/o-encadeamento-da-industria-do-cimento-no-brasil-2/>. Acesso em: 20 set. 2024.

HASPARYK, Nicole Pagan. *et al.* **RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS PARA A PREVENÇÃO DA DEF E DA FISSURAÇÃO TÉRMICA NO CONCRETO**. São Paulo: Arte Interativa, 2023. 76 p.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Controle de Qualidade do Concreto**. 1980. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil Pcc/Usp, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para dosagem e controle dos concretos de cimento Portland**. 1987. 278 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

HELENE, Paulo. A Resistência do Concreto sob Carga Mantida e a Idade de Estimativa de Resistência Característica. In: III SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1993, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Epusp, 1993. p. 271-282.

HELENE, Paulo R. L.. Concreto de Elevado Desempenho: o material para construção das obras no ano 2000. **Engenharia e Construção**: Luso Brasileira, Curitiba, n. 18, p. 11-13, mar. 1998. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/1998/06/concreto-elevado.compressed.pdf>. Acesso em: 16 maio 2025.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo C. (ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2017. Cap. 29. p. 970-1005.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Pini, 1992. 349 p.

HELENE, Paulo; LEVY, Salomon. Curado del hormigón. In: CONPAT, 2013, Cartagena. **Boletín Técnico**. Mérida: Alconpat, 2013. p. 1-12.

IRASSAR, E. F.; BONAVETTI, V. L.; MENÉNDEZ, G.; CARRASCO, M. F.. Hidratación y propiedades de cemento ternarios con filler calcáreo y escoria. **Revista Alconpat**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 83-95, 30 maio 2015. Alconpat Internacional. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i2.79>.

JERATH, Sukhvarsh; KABBANI, Isam A.. Computer-Aided Concrete Mix Proportioning. **Aci Journal Proceedings**, [S.L.], v. 80, n. 4, p. 312-317, jul. 1983. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/10854>.

KLIEGER, Paul. Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength. **Journal Of The American Concrete Institute**, Detroit, v. 29, n. 12, p. 1063-1081, fev. 1958.

KOSMATKA, Steven H.; WILSON, Michelle L.. **Design and Control of Concrete Mixtures**: the guide to applications, methods, and materials. 15. ed. Washington DC: PCA - Portland Cement Association, 2011. 444 p.

LARRARD, François de. **Concrete Mixture Proportioning**: a scientific approach. London: E & Fn Spon, 1999.

LEA, F. M.. **The Chemistry of Cement and Concrete**. 3. ed. Glasgow: Edward Arnold, 1970. 727 p.

LEVY, Salomon; HELENE, Paulo. Cura: como, quando e por quê. **Téchne**, São Paulo, v. 4, n. 20, p. 18-21, jan. 1996.

LIMA, Eliane Pereira de. **Influência do volume da pasta na zona de transição pasta/agregado com relação às propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto**. 2000. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil Pcc/Usp, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MANDAL, Sasankasekhar; ANAND, Vishwajit; AGARWALA, Sushil Kumar. **Concrete Technology**: theory and practice. New Delhi: Aicte, 2023. 253 p. Revisado por M. L. Waikar.

MARUYAMA, Ippei; NOGUCHI, Takafumi; MATSUSHITA, Tetsuro. HYDRATION MODEL OF PORTLAND CEMENT. **Journal Of Structural And Construction Engineering (Transactions Of Aij)**, [S.L.], v. 70, n. 593, p. 1-8, 2005. Architectural Institute of Japan. http://dx.doi.org/10.3130/aijs.70.1_7.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994. 573 p. Capítulo 3. Tradução e adaptação Prof. Antonio Carmona Filho.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concrete**: microstructure, properties, and materials. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006. 660 p.

MOCCIA, Francesco; YU, Qianhui; RUIZ, Miguel Fernández; MUTTONI, Aurelio. Concrete compressive strength: from material characterization to a structural value. **Structural Concrete**, [S.L.], v. 22, n. 1, p. 1-21, 24 jul. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.202000211>.

NEVILLE, A. M.. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. **Concrete Technology**. 2. ed. London: Pearson, 2010. 442 p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p. Tradução de: Ruy Alberto Cremonini.

NOBRE, Thiago Ricardo Santos; PÉREZ, Martha González; BLOISE JUNIOR, Antônio Carlos; ANGULO, Sérgio Cirelli; OTA, Shoko; QUARCIONI, Valdecir Angelo. Caracterização de fases de cimento Portland por meio das técnicas de difratometria de raios X e espectroscopia de ressonância magnética nuclear de ^{29}Si no estado sólido. **Revista Ipt: Tecnologia e Inovação**, São Paulo, v. 6, n. 19, p. 67-88, maio 2022.

PAULON, Vladimir; ANDRADE NETO, José da Silva; LONGHI, Márion; KIRCHHEIM, Ana Paula. Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido. In: TUTIKIAN, Bernardo; PACHECO, Fernanda; ISAÍÁ, Geraldo; BATTAGIN, Inês (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2022. Cap. 16. p. 661-698.

PAULON, Vladimir A.; MONTEIRO, Paulo José M.. **Estudos da Microestrutura da Zona de Transição entre a Pasta de Cimento e o Agregado**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP, 1991. 32 p. BT/PCC/43.

PERES, L. D. P. *et al.* Avaliação da resistência à compressão do concreto em vigas pré-moldadas submetidas à cura térmica por meio do Método da Maturidade. **IBRACON Structural Journal**, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 121-142, mar. 2007.

PETRUCCI, Eládio. G.. **Concreto de Cimento Portland**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1968. 198 p.

POWERS, T. C.; BROWNYARD, T. L.. Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste: relation of physical characteristics of the paste to compressive strength. **Journal Of The American Concrete Institute**, Detroit, v. 18, n. 7, p. 845-992, mar. 1947.

POWERS, T. C.. The Nature of Concrete. STP – Special Technical Publication. **American Society for Testing and Materials**, Skokie, v. 169-A, p. 61-72, jan. 1966.

POWERS, T. C.. Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. STP – Special Technical Publication. **Journal of The American Ceramic Society**, Chicago, v. 41, p. 1-6, mar. 1958.

PRICE, Walter H.. Factors Influencing Concrete Strength. **Journal Of The American Concrete Institute**, Detroit, v. 22, n. 6, p. 417-432, fev. 1951.

QUARCIONI, Valdecir Angelo *et al.* Estudo IPT de concreto com idades avançadas: histórico e aspectos gerais. **Concreto & Construções**, São Paulo, v. 47, n. 97, p. 52-60, jan. 2020. Trimestral. IBRACON.

REVISTA TÉCNICA ESTRUTURA DAS CONSTRUÇÕES. Rio de Janeiro: Revista Editada Pelo Professor Aderson Moreira da Rocha, n. 47, 1962.

RÜSCH, H.. Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete. **Journal Of The American Concrete Institute**, Detroit, v. 57, n. 1, jul. 1960. 28p.

RÜSCH, Hubert. **Hormigon Armado y Hormigon Pretensado**: propiedades de los materiales y procedimientos de cálculo. Barcelona: Compañía Editorial Continental S. A., 1975. 417 p.

SANCHEZ, Leandro F. M.. **Internal Swelling Reactions in Concrete**: mechanisms and condition assessment. Boca Raton: Crc Press Taylor & Francis Group, 2024. 201 p.

SANTOS, Lauro Modesto dos. **Cálculo de Concreto Armado**: segundo a nb-1/76 e o ceb/72. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 409 p. Volume 1.

SCHILLER, K.K.. Strength of porous materials. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 1, n. 4, p. 419-422, jul. 1971. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(71\)90035-4](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(71)90035-4).

SCHINDLER, Anton K. *et al.* **EVALUATION OF THE MATURITY METHOD TO ESTIMATE CONCRETE STRENGTH**. Auburn: Department of Civil Engineering at Auburn University, 2006. 295 p.

SCHUTTER, Geert de.. Applicability of degree of hydration concept and maturity method for thermo-visco-elastic behaviour of early age concrete. **Cement & Concrete Composites**, Oxford, n. 26, p. 437-443, 2004.

SCRIVENER, Karen L.; PRATT, Peter L.. Characterisation of interfacial microstructure. In: MASO, J. C. (ed.). **Interfacial Transition Zone in Concrete**. Toulouse: E & Fn Spon, 1996. p. 2-20.

SHETTY, M. S.; JAIN, A. K.. **Concrete Technology**: theory and practice. 8. ed. New Delhi: S. Chand, 2024. 636 p.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório Anual 2023**. 2024. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-relatorio-anual.php>. Acesso em: 11 dez. 2024.

SLATER, W. A.. Relation of 7-Day to 28-Day Compressive Strength of Mortar and Concrete. **Aci Journal Proceedings**, Washington, Dc, v. 22, n. 2, p. 437-449, 1926. American Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.14359/15616>.

SUBHANI, S. Mahaboob; HUSSAIN, S. Altaf; REDDY, P. Dinesh Sankar. Comparison of particle size distribution estimated by Rosin-Rammler equation vs Malvern particle size analyzer for different brands of PPC cement. **Bulgarian Chemical Communications**, Sofia, v. 53, n. 1, p. 40-43, fev. 2021. Trimestral. Revisada em 05/02/2022.

SWENSON, J. Arthur; WAGNER, Lacey A.; PIGMAN, George L.. Effect of granulometric composition of cement on the properties of pastes, mortars and concretes. **Journal Of Research Of The National Bureau Of Standards**, Washington, v. 14, p. 419-448, abr. 1935. Mensal. Research Paper RP777.

TANGO, Carlos Eduardo de Siqueira. **Contribuição ao estudo da previsão da resistência à compressão de cimentos e concretos**. 1983. 462 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

TANGO, Carlos Eduardo de Siqueira. **Um estudo do desenvolvimento da resistência à compressão do concreto de cimento Portland até 50 anos de idade**. 1990. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

TAYLOR, H. F. W.. **Cement chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997. 459 p.

THE history of Louis Vicat. Disponível em: <https://www.vicat.com/about-us/vision/history-of-louis-vicat>. Acesso em: 08 jan. 2025.

THOMAZ, Eduardo C. S.. **Notas de Aula IME - Instituto Militar de Engenharia: efeito da finura do cimento. Efeito da Finura do Cimento**. Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/>. Acesso em: 10 nov. 2024a.

THOMAZ, Eduardo C. S.. **Notas de Aula IME - Instituto Militar de Engenharia: dosagem do concreto. Dosagem do Concreto**. Disponível em: http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/pad_cimentos.htm. Acesso em: 30 jun. 2024b.

TUTIKIAN, Bernardo F.; HELENE, Paulo. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: TUTIKIAN, Bernardo; PACHECO, Fernanda; ISAÍÁ, Geraldo; BATTAGIN, Inês (ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2022. Cap. 12. p. 485-527.

VESILIND, P. Aarne. The Rosin-Rammler particle size distribution. **Resource Recovery And Conservation**, [S.L.], v. 5, n. 3, p. 275-277, set. 1980. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3967\(80\)90007-4](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3967(80)90007-4).

XIE, Shasha; CHENG, Zhiyuan; WAN, Li. Hydration And Microstructure Of Astm Type I Cement Paste. **Science And Engineering Of Composite Materials**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 215-220, 1 jan. 2019. <http://dx.doi.org/10.1515/secm-2019-0004>.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado segundo a NBR 6118: 2003**. 3. ed. São Carlos: Edufscar, 2012. 367 p.

CERQUEIRA, Francisco Carvalho de. Controle Estatístico da Resistência à Compressão do Concreto. **Revista Tecnologia Fortaleza**, Fortaleza, n. 21, p. 49-56, dez. 2000.

COUTINHO, A. de Sousa; GONÇALVES, Arlindo. **FABRICO E PROPRIEDADES DO BETÃO**: volume iii. 2. ed. Lisboa: Lnce, 1994. 368 p.

DIAS, José Luciano de Mattos; LIMA, Denise. **História da normalização brasileira**. Rio de Janeiro: Abnt, 2011. 112 p. Coordenação: Monalisa Zia.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Dicionário Aurélio da Língua portuguesa**. 5. ed. Curitiba: Editora Positivo, 2010. 2272 p.

FÜRSTENAU, Eugênio. **Novo Dicionário de Termos Técnicos Inglês - Português**. 26. ed. São Paulo: Globo, 2003. 1413 p.

LEONHARDT, Fritz; MÖNNIG, Eduard. **Construções de Concreto**: vol.1: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1977. 336 p. Tradução de: David Fridman.

MAHAN, Bruce M.; MYERS, Rollie J.. **Química**: um curso universitário. São Paulo: Edgard Blucher, 1995. 582 p. Tradução de Koiti Araki, Denise de Oliveira Silva e Flávio Massao Matsumoto.

MONTOYA, Jiménez. **Hormigón armado**. 15. ed. Barcelona: Gg, 2009. 629 p.

PRISZKULNIK, Simão. O cimento e as variações volumétricas da pasta. In: COLÓQUIO IBRACON, 1978, São Paulo. **Retração e deformação lenta do concreto**. São Paulo: Ibracon, 1978. p. 1-89.

SCANDIUZZI, Luercio; ANDRIOLO, Francisco Rodrigues. **Concreto e seus Materiais**: propriedades e ensaios. São Paulo: Pini, 1986. 553 p.

STEWART, James. **Cálculo**: volume 1. 5. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2008.

VIEIRA FILHO, José Orlando. **AValiação da Resistência à Compressão do Concreto Através de Testemunhos Extraídos**: contribuição à estimativa do coeficiente de correção devido aos efeitos do broqueamento. 2007. 216 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

WITTE, Robert S.; WITTE, John S.. **ESTATÍSTICA**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2005. 486 p.

Anexo A

Estudo de Amaral Filho (1945).

Informações e dados de resistência à compressão do concreto.

Em trabalho publicado em maio de 1945 na Revista Politécnica, o Eng. Epaminondas Melo do Amaral Filho analisou os resultados de resistência à compressão de corpos de prova ensaiados em um período de 4 anos, entre janeiro de 1939 a janeiro de 1943.

Foram ensaiados à compressão corpos de prova cilíndricos com dimensões de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, moldados, sazoados e rompidos de acordo com os Métodos Brasileiros MB-2 e MB-3, em vigor na época.

Os ensaios foram realizados em concretos dosados com pedregulho e areia, esta última proveniente do Rio Tietê localizado no estado de São Paulo. A consistência de todos os concretos era mediantemente plástica, com abatimento variando entre 10 e 15 cm, obtido no ensaio de “*slump test*”. Os concretos foram produzidos com cimento Portland Comum Classe 250 (resistência à compressão de 250 kgf/cm² aos 28 dias de idade), de acordo com a especificação brasileira EB-1 de 1937, oriundos de 3 fábricas distintas (denominadas A, S e D). Para cada marca de cimento, foram produzidos 4 traços, com relações *w/c* de 0,5; 0,6; 0,7 e 0,8.

Foram ensaiadas 196 amostras do concreto produzido com o cimento da marca A, 168 amostras do concreto produzido com o cimento da marca S e 196 amostras do concreto produzido com o cimento da marca D. Cada amostra era composta por 3 exemplares para ruptura aos 3, 7 e 28 dias de idade. Cada exemplar, por sua vez, era composto por 2 corpos de prova irmãos. Estes resultados foram estudados e apresentados em Amaral Filho (1945)^a e correspondem à média dos valores de ruptura de 2 corpos de prova irmãos, totalizando 1.641 resultados, conforme apresentado nas Tabelas A.1, A.2 e A.3, para os concretos produzidos com os cimentos da marca A, S e D, respectivamente.

^a AMARAL FILHO, Epaminondas Melo do.. Estudo da previsão da resistência à compressão dos concretos. Revista Politécnica, São Paulo, n. 146, p. 345-354, mai. 1945.

Tabela A.1 – Resultados de resistência à compressão do concreto produzido com cimento da marca A.

Traço: w/c = 0,5			Traço: w/c = 0,6			Traço: w/c = 0,7			Traço: w/c = 0,8		
Resistência à compressão kgf/cm ²			Resistência à compressão kgf/cm ²			Resistência à compressão kgf/cm ²			Resistência à compressão kgf/cm ²		
3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias
142	216	296	86	169	254	76	128	170	45	84	132
171	208	307	105	154	226	69	107	178	-	72*	128*
137	200	298	92	137	201	61	93	165	41	68	118
144	217	326	84	133	215	54	85	146	31	57	105
143	227	309	101	179	259	76	123	202	39	80	143
123	186	308	68	139	242	41	80	174	24	52	105
139	226	323	83	136	231	41	76	152	24	51	106
143	236	340	83	130	262	54	105	184	31	57	125
131	221	328	72	122	211	40	72	143	24	43	103
113	217	318	65	138	217	41	81	137	27	58	107
107	184	302	67	122	181	44	72	160	26	51	110
99	183	324	62	115	225	41	81	172	24	54	120
128	183	261	84	142	197	54	83	129	35	51	102
140	220	354	70	138	232	41	85	174	21	48	99
121	215	346	70	130	235	46	79	169	31	57	144
147	237	341	95	146	254	57	110	177	35	68	120
98	189	319	74	143	229	50	98	156	28	59	118
114	194	260	83	144	207	46	98	167	27	60	117
118	236	336	77	176	257	40	119	205	25	70	141
155	260	377	106	196	283	56	108	209	32	66	129
140	232	326	81	149	228	47	96	158	25	60	89
189	262	360	120	169	262	71	124	192	39	76	121
157	250	340	89	173	262	50	96	173	34	69	121
138	203	304	87	150	243	59	109	154	43	81	118
110	194	297	66	115	196	44	71	139	25	46	111
122	197	226	72	124	135	47	89	121	31	52	92
82	141	246	32	77	157	31	49	120	20	31	78
117	179	280	87	129	223	43	75	152	26	47	112
155	252	322	122	176	237	74	106	174	46	72	116
105	209	317	82	168	229	49	111	171	34	73	118
155	259	378	94	169	244	53	108	202	35	70	132
143	222	339	73	144	227	49	119	204	29	50	113
141	220	312	89	165	227	57	106	156	36	67	113
144	257	334	82	173	257	53	108	170	27	68	116
170	258	334	109	189	258	65	120	196	42	74	110
175	270	375	103	187	266	83	127	201	50	83	128
215	292	403	143	232	317	96	174	246	49	109	166
188	270	376	137	211	296	82	137	203	55	97	153
156	264	315	115	200	241	86	144	203	53	93	134
191	274	374	122	206	300	71	124	203	47	87	153
162	229	333	97	177	275	60	109	189	35	75	126
153	250	337	99	170	248	60	125	172	42	74	135
142	251	374	92	193	292	49	118	188	28	70	127
145	218	301	101	164	274	60	105	166	36	64	123
141	229	351	88	187	286	56	127	210	36	75	133
166	218	327	101	173	243	63	106	173	35	70	110
143	232	313	98	161	263	56	98	145	32	62	115
110	209	306	71	135	204	46	85	154	29	52	112
101	193	270	58	114	192	34	72	136	20	47	91

Fonte: Amaral Filho (1945), p. 346.

(*) resultados não utilizados na análise desta dissertação

Tabela A.2 – Resultados de resistência à compressão do concreto produzido com cimento da marca S.

Traço: w/c = 0,5			Traço: w/c = 0,6			Traço: w/c = 0,7			Traço: w/c = 0,8		
Resistência à compressão kgf/cm ²			Resistência à compressão kgf/cm ²			Resistência à compressão kgf/cm ²			Resistência à compressão kgf/cm ²		
3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias
124	151	233	101	126	199	60	84	147	51	62	109
134*	173*	-	91*	127*	-	71*	91*	-	47*	61*	-
172*	201*	-	124*	147*	-	73*	107*	-	58*	88*	-
172	189	279	121	150	214	76	112	173	53	67	116
77	201	304	59	154	209	37	107	170	24	71	112
153	195	293	55	153	255	55	106	178	36	73	132
177	237	268	129	181	200	80	122	160	55	82	109
168	200	300	114	150	191	90	117	179	59	84	120
187	224	290	138	198	230	99	161	191	65	106	147
189	244	310	130	180	236	93	133	189	65	88	139
140	178	256	106*	131*	-	86	120	158	61	84	121
165	215	285	127	188	247	104	156	203	73	100	147
155	214	329	130	191	230	99	127	189	65	86	141
141	177	280	105	145	199	65	92	158	24	43	88
-	149*	218*	84	112	175	65	91	138	38	58	91
148	222	317	117	189	259	66	120	167	46	87	138
151	201	316	102	139	223	67	110	168	46	72	120
144	232	300	115	182	251	76	115	155	47	86	121
165	207	275	111	151	201	84	102	153	56	72	111
165	192	365	104	134	310	84	110	265	53	72	235
129	181	246	88	120	183	64	96	140	44	61	106
143	208	307	104	132	197	68	102	158	44	69	111
128	203	290	91	138	217	60	92	146	41	67	111
150	204	273	103	136	216	61	93	145	40	59	104
138	241	338	74	162	242	50	109	171	33	77	115
146	183	289	103	144	229	72	107	166	45	71	119
117	185	257	80	122	195	54	87	140	40	66	105
135	189	270	90	134	186	54	92	105	35	55	108
144	191	273	93	141	216	64	92	171	37	63	121
125	190	236	94	157	173	64	93	147	41	70	103
130	194	273	98	137	194	62	101	152	44	70	121
134	192	226	90	117	187	69	94	118	40	62	92
177	244	308	133	196	243	86	133	187	52	76	140
170	258	336	118	180	241	92	143	191	58	90	136
146	202	295	114	161	249	78	101	160	54	78	121
153	217	278	96	180	237	72	112	187	49	81	115
150	206	267	92	150	187	65	96	137	42	65	112
158	225	297	99	181	245	64	113	173	45	83	126
144	233	309	104	179	244	65	107	175	44	81	137
143	196	288	107	160	223	59	103	168	41	65	120
129	181	259	81	127	199	47	81	136	35	57	95
126	196	260	85	138	211	53	103	137	34	70	105

Fonte: Amaral Filho (1945), p. 347.

(*) resultados não utilizados na análise desta dissertação

Tabela A.3 – Resultados de resistência à compressão do concreto produzido com cimento da marca D.

Traço: w/c = 0,5			Traço: w/c = 0,6			Traço: w/c = 0,7			Traço: w/c = 0,8		
Resistência à compressão kgf/cm ²			Resistência à compressão kgf/cm ²			Resistência à compressão kgf/cm ²			Resistência à compressão kgf/cm ²		
3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias	3 dias	7 dias	28 dias
165*	198*	-	101	136	182	71	94	142	50	72	103
161	214	299	103	143	240	59	96	158	46	73	108
138	188	251	98	138	176	64	106	145	47	65	107
173	233	286	103	159	209	68	100	155	43	64	111
155	194	284	101	155	229	65	110	160	44	69	108
120	174	252	67	113	182	38	84	143	29	53	109
137	235	315	73	135	204	45	86	140	29	62	115
152	217	285	97	155	220	46	100	161	33	58	101
141	176	252	95	126	170	55	85	126	35	65	99
144	209	284	97	139	192	55	98	146	40	71	107
145	226	299	107	171	205	75	118	155	47	73	121
116	149	256	83	112	171	48	86	150	35	56	100
161	230	279	117	159	224	72	115	177	53	78	122
141	182	304	98	132	243	62	94	177	43	64	134
127	194	296	93	141	225	68	84	149	36	52	97
138	220	284	98	146	197	80	119	174	44	64	107
155	220	308	112	182	239	75	116	200	43	74	138
122	212	303	95	177	256	67	125	180	38	68	130
110	177	283	80	134	214	51	85	144	33	53	104
141	217	333	90	151	232	57	97	173	36	61	116
160	232	321	88	172	252	62	119	184	42	70	141
147	254	318	112	180	260	75	143	219	45	89	170
187	252	306	117	174	221	86	126	170	56	81	128
153	219	279	122	165	210	94	146	174	56	91	189
143	212	313	117	171	227	79	126	174	55	83	143
171	225	325	112	152	219	70	111	169	44	65	123
123	197	293	78	136	211	49	86	159	33	59	111
163	259	314	127	210	256	86	136	178	53	85	122
176	289	324	120	220	254	83	140	194	45	86	140
137	242	297	109	177	249	70	119	170	43	81	180
154	215	302	118	168	209	74	118	153	45	70	111
158	241	298	104	169	224	57	125	177	36	74	120
160	237	295	116	176	218	72	104	180	40	76	126
128	197	300	93	135	193	64	88	150	41	54	96
154	202	264	103	155	202	76	115	161	50	71	103
177	235	315	125	185	268	81	119	183	55	84	140
167	222	296	130	171	223	92	117	160	55	84	131
136	178	268	101	148	212	65	98	158	44	63	119
120	158	280	89	133	229	62	92	144	43	61	111
130	176	270	91	126	182	66	93	151	44	61	108
124	184	247	105	150	204	72	119	163	51	84	126
155	231	267	110	149	208	72	116	157	45	74	122
162	235	326	102	168	249	59	110	183	37	73	122
156	211	260	117	162	230	76	108	164	50	76	121
147	181	270	107	140	206	80	109	175	54	72	129
125*	183*	-	96	135	185	72	100	141	41	62	109
159	217	269	111	171	222	79	130	170	50	86	134
132	196	278	77	126	197	47	96	143	29	52	109
127	186	267	84	128	192	51	81	142	34	52	93

Fonte: Amaral Filho (1945), p. 348.

(*) resultados não utilizados na análise desta dissertação

Anexo B

Estudo de Tango (1983).

Informações e dados de resistência à compressão do concreto.

Em dissertação apresentada à Escola Politécnica da USP no ano de 1983, sob orientação da Prof.^a Dra. Yasuko Tezuka, o Eng. Carlos Eduardo de Siqueira Tango, pesquisador da Divisão de Engenharia Civil do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) analisou 7.820 resultados de resistência à compressão de concretos produzidos entre janeiro de 1957 até maio de 1979 (TANGO, 1983)^a. Trata-se de parte de banco de dados de resistência à compressão do Laboratório de Concreto do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), que teve início no ano de 1933.

Os resultados contemplam concretos produzidos com relações w/c variando, em média, de 0,45 a 0,75, produzidos com cimentos de 3 diferentes fábricas nacionais (denominadas A, B e C), todos com cimento Portland comum. Foram produzidos 4 diferentes traços a saber (cimento:agregado): 1:5; 1:6; 1:7 e 1:8. O agregado miúdo utilizado nos traços é areia lavada do Rio Tietê, com módulo de finura variando de 5,17 a 5,74. O agregado graúdo utilizado foi o seixo rolado lavado, de granulometria imposta, proveniente do Rio Tietê com módulo de finura igual a 7,05.

Os ensaios de ruptura foram realizados em 4 diferentes idades: 2, 3, 7 e 28 dias de idade.

As Tabelas B.1 a B.25 apresentam todos os resultados de resistências supramencionados, conforme ano de produção, fábrica de cimento, traço, relação w/c e data de ruptura.

^a TANGO, Carlos Eduardo de Siqueira. Contribuição ao estudo da previsão da resistência à compressão de cimentos e concretos. 1983. 462 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

Tabela B.1 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1957.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,467	0,560	0,669	0,783	9,7	7,5	4,1	2,4	16,0	9,7	6,0	3,8	20,7	15,2	9,2	6,7	31,7	24,9	20,2	13,7	A
0,467	0,560	0,669	0,783	9,4	6,2	3,7	2,6	12,9	8,3	5,9	4,0	21,1	15,2	11,2	7,6	29,9	24,0	17,4	13,4	A
0,445	0,534	0,638	0,747	10,3	6,8	4,2	3,2	14,5	9,3	6,2	4,1	23,3	15,4	12,0	8,9	32,5	23,1	20,6	15,5	A
0,445	0,534	0,638	0,748	11,1	7,7	4,5	3,1	16,9	10,9	7,6	5,2	25,0	17,8	12,6	8,0	35,2	30,6	21,5	16,8	A
0,445	0,534	0,638	0,747	9,6	5,4	3,4	2,3	12,9	8,5	5,5	3,5	22,0	14,6	10,2	6,3	31,1	25,0	17,6	12,6	A
0,456	0,547	0,653	0,765	9,6	5,5	3,3	2,0	13,9	7,8	4,8	3,4	20,5	15,5	9,5	6,2	32,3	26,1	18,4	12,1	A
0,445	0,533	0,638	0,748	12,3	7,7	4,5	3,0	16,7	11,1	6,6	3,9	27,2	18,5	13,3	8,4	34,8	26,4	19,8	12,9	A
0,472	0,567	0,677	0,792	6,4	3,8	2,3	1,5	9,5	6,1	3,9	2,8	18,5	13,0	9,3	5,6	31,7	24,1	17,2	12,4	A
0,467	0,560	0,669	0,783	6,3	3,4	2,9	1,5	9,5	6,2	8,9	2,8	15,5	11,7	7,0	4,6	25,9	19,5	14,3	10,1	A
0,467	0,560	0,669	0,783	9,1	6,1	3,8	2,6	13,2	7,6	5,5	3,2	19,6	14,5	9,8	6,2	31,9	22,6	18,2	12,5	A
0,456	0,547	0,654	0,765	12,6	7,3	4,6	2,9	17,0	9,8	6,4	4,0	24,6	17,4	11,1	7,4	38,5	29,9	21,8	15,1	A
0,445	0,533	0,638	0,747	6,9	3,6	2,6	2,3	9,8	6,4	4,6	3,7	15,6	11,3	7,0	5,3	29,4	24,0	17,9	12,6	A
0,456	0,547	0,653	0,765	15,0	10,1	6,6	4,2	18,8	13,2	8,5	6,0	25,1	19,7	14,2	11,0	30,7	25,5	19,3	14,6	B
0,456	0,547	0,653	0,765	10,7	6,8	4,2	3,0	13,2	8,0	5,5	3,5	18,4	12,1	8,9	6,8	25,2	18,0	13,5	10,4	B
0,445	0,534	0,638	0,748	12,4	8,1	5,2	3,2	14,2	10,5	6,8	4,9	20,1	14,8	9,7	6,8	27,2	19,6	15,3	11,5	B
0,456	0,547	0,654	0,765	13,7	11,0	5,9	4,0	17,9	12,3	7,9	5,3	24,3	17,0	11,8	8,0	30,3	22,0	15,6	12,7	B
0,467	0,560	0,669	0,783	8,2	4,6	2,8	2,0	10,4	6,7	4,0	2,9	15,8	10,2	6,7	5,1	24,4	18,1	12,8	11,1	B
0,467	0,560	0,669	0,783	9,0	5,5	3,4	2,6	11,6	7,0	4,9	3,2	16,0	13,5	8,9	5,7	27,5	18,5	14,2	10,1	B
0,467	0,560	0,669	0,783	9,0	5,6	3,5	2,3	13,8	8,7	5,0	3,3	22,9	16,8	11,2	7,7	31,1	24,2	18,6	13,6	B
0,467	0,560	0,669	0,783	11,5	7,5	4,6	3,0	14,7	9,4	5,7	3,6	21,6	14,1	10,2	6,5	31,0	21,7	18,0	12,9	B
0,467	0,560	0,669	0,783	5,7	3,6	2,6	1,8	7,0	5,0	3,3	2,6	14,6	11,2	7,7	5,5	23,2	19,4	13,8	11,8	B
0,456	0,547	0,654	0,765	8,5	5,4	3,0	2,4	10,2	6,9	4,5	3,0	16,6	11,7	7,5	5,4	25,4	18,2	13,5	10,0	B
0,456	0,547	0,653	0,765	11,6	7,1	4,4	3,0	14,6	10,1	7,0	4,5	22,5	18,1	13,2	10,3	29,7	26,0	20,0	14,5	B
0,456	0,547	0,654	0,765	12,6	8,0	4,3	3,3	16,1	11,0	6,7	5,3	24,0	17,8	10,4	8,3	30,0	23,8	11,5	13,1	C
0,450	0,540	0,638	0,739	13,8	9,6	6,2	3,5	15,5	11,3	8,4	4,9	21,3	16,1	12,5	9,5	29,4	23,3	19,1	14,7	C
0,445	0,533	0,638	0,747	13,0	7,7	5,9	3,6	16,1	9,5	6,7	9,5	19,6	13,2	11,0	8,0	26,2	21,3	15,6	13,1	C
0,467	0,560	0,669	0,783	13,7	8,1	6,5	3,6	16,9	10,5	7,8	5,7	22,2	16,3	11,7	8,8	29,1	22,2	17,0	12,9	C
0,467	0,560	0,669	0,783	13,0	8,4	5,0	3,2	15,6	10,5	6,9	4,4	21,5	15,2	9,3	6,5	31,3	22,7	14,8	11,2	C
0,467	0,560	0,669	0,783	9,2	6,0	3,6	2,5	11,5	7,7	4,8	3,2	18,2	11,8	7,5	5,6	26,8	17,9	13,0	9,4	C
0,467	0,560	0,669	0,783	14,9	8,8	5,3	3,5	16,8	11,0	6,9	4,1	24,0	16,1	10,9	7,7	28,5	23,3	15,4	12,1	C
0,467	0,560	0,669	0,765	10,1	6,8	4,2	2,7	12,9	8,7	5,8	3,6	20,8	13,1	9,2	6,9	28,5	21,5	15,9	11,5	C
0,478	0,574	0,669	0,783	7,6	4,8	3,3	2,5	11,5	6,6	5,0	3,5	19,0	12,3	9,3	6,4	26,3	17,9	12,5	9,8	C
0,467	0,560	0,669	0,783	12,9	7,4	4,9	3,1	16,3	10,9	6,7	4,1	21,3	15,3	9,3	6,6	29,3	23,2	15,3	11,2	C
0,445	0,534	0,638	0,747	10,2	6,8	4,3	2,6	14,2	9,1	6,5	3,8	21,3	16,4	11,6	7,5	29,5	25,3	18,1	12,1	C
0,456	0,547	0,653	0,765	12,0	7,6	5,6	3,4	16,1	10,1	6,9	4,7	20,7	16,3	11,5	9,1	25,9	21,1	17,4	12,8	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.2 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1958.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,456	0,547	0,653	0,765	4,8	3,1	2,3	1,3	8,6	6,4	4,4	3,0	15,9	10,6	8,3	5,1	26,9	20,7	15,6	11,2	A
0,467	0,560	0,653	0,765	7,9	5,4	3,4	2,3	12,0	6,6	4,4	3,4	18,1	12,5	8,9	5,6	28,2	22,4	17,7	12,6	A
0,445	0,534	0,622	0,730	8,5	5,0	3,4	2,5	12,6	7,7	6,2	4,0	19,3	13,4	9,2	6,7	29,2	21,4	17,1	13,1	A
0,467	0,560	0,669	0,783	6,9	4,2	2,7	1,6	11,1	7,5	4,0	2,9	17,4	11,8	7,5	5,1	28,4	21,3	16,4	10,8	A
0,495	0,533	0,622	0,730	7,6	4,5	2,9	1,9	12,9	7,6	4,9	3,1	21,1	14,0	11,5	7,2	31,9	25,0	18,1	13,8	A
0,456	0,547	0,638	0,747	7,9	5,3	3,5	2,4	10,8	8,1	5,6	3,5	18,3	12,9	9,9	6,2	28,4	23,9	17,3	13,1	A
0,445	0,533	0,622	0,730	8,5	5,7	3,3	2,5	13,1	8,6	5,4	3,5	20,3	13,2	9,8	7,3	29,7	23,1	19,0	13,2	A
0,456	0,547	0,638	0,747	10,6	6,6	4,3	2,6	15,7	10,0	6,6	4,1	22,3	16,3	10,6	7,8	31,9	25,7	19,7	14,7	A
0,463	0,518	0,685	0,729	7,1	5,7	3,8	2,4	11,8	9,1	7,4	3,9	19,0	14,9	12,2	5,7	30,0	24,9	20,0	13,9	A
0,474	0,543	0,612	0,757	10,1	7,5	5,1	2,6	13,3	10,2	7,2	4,1	20,6	17,2	12,7	9,3	26,7	21,9	17,6	12,6	A
0,474	0,543	0,639	0,757	6,5	4,8	3,2	2,0	10,4	7,3	5,0	3,3	16,9	11,5	8,6	5,6	23,5	16,9	12,9	8,6	A
0,467	0,560	0,669	0,783	9,6	6,5	3,8	2,8	13,2	8,5	5,8	3,5	20,1	13,7	11,5	7,2	26,8	18,9	16,2	11,9	B
0,478	0,573	0,669	0,783	13,3	8,2	6,0	4,0	15,4	11,0	7,5	4,8	22,7	17,4	14,8	9,9	26,7	21,3	16,4	14,2	B
0,456	0,547	0,638	0,747	10,5	6,9	5,2	3,4	13,4	8,8	7,5	5,0	21,3	16,2	12,2	8,8	28,4	19,7	16,4	13,5	B
0,467	0,560	0,669	0,783	13,2	9,1	6,2	4,5	17,9	11,8	8,2	6,0	22,5	17,1	13,6	8,3	30,2	23,6	17,2	13,0	B
0,495	0,533	0,622	0,730	9,6	6,7	4,3	2,8	13,8	9,4	6,0	4,3	21,9	16,0	11,9	7,8	28,2	23,7	17,1	13,2	B
0,467	0,560	0,653	0,747	9,2	5,7	3,8	2,8	14,4	9,1	6,6	3,9	23,4	17,2	13,5	8,8	30,5	23,4	17,2	14,2	B
0,445	0,533	0,622	0,730	12,9	7,4	4,2	2,9	16,1	11,3	7,0	4,8	22,8	18,2	13,3	8,6	28,8	23,7	18,8	14,2	B
0,450	0,540	0,630	0,730	10,5	6,7	4,6	2,9	16,0	11,3	7,3	4,5	23,5	19,4	15,6	9,9	29,2	23,2	19,2	15,5	B
0,485	0,541	0,629	0,759	9,8	6,1	3,9	2,6	14,3	9,8	7,1	4,0	20,3	16,4	13,3	8,9	31,4	26,3	19,9	15,2	B
0,474	0,543	0,639	0,772	9,8	7,7	5,2	2,9	13,4	11,1	7,8	4,2	18,9	15,6	11,5	8,3	28,6	22,7	15,8	11,0	B
0,474	0,543	0,639	0,772	11,1	8,8	5,1	2,9	16,3	12,4	7,7	4,8	22,5	16,9	14,9	8,6	29,5	26,1	19,5	13,5	B
0,456	0,547	0,653	0,765	10,3	7,4	4,6	3,1	14,3	10,1	6,7	4,6	19,7	14,9	9,7	7,0	27,4	23,1	15,6	11,3	C
0,467	0,560	0,669	0,783	10,3	6,8	4,2	3,1	13,7	9,7	6,6	4,7	21,3	12,8	9,8	7,4	27,4	19,7	15,2	11,2	C
0,467	0,560	0,654	0,765	8,3	5,3	3,6	2,4	11,4	7,5	5,0	3,2	16,5	12,1	8,7	6,0	22,6	16,7	13,1	9,6	C
0,456	0,547	0,654	0,765	11,9	7,5	5,0	3,2	14,2	9,6	6,8	5,4	18,2	13,3	10,3	7,1	28,4	20,1	15,4	12,0	C
0,456	0,547	0,638	0,747	12,7	7,9	5,2	4,2	16,2	10,9	7,1	5,1	20,8	14,5	10,3	7,7	29,1	19,6	14,1	11,1	C
0,449	0,533	0,622	0,730	8,4	5,8	3,7	2,6	10,5	7,7	5,6	3,2	17,4	12,7	9,6	6,4	30,6	21,2	17,4	13,1	C
0,445	0,533	0,622	0,730	8,4	5,6	3,9	2,6	12,4	7,9	6,1	3,7	21,5	14,4	11,0	7,9	26,8	20,4	16,6	11,8	C
0,461	0,553	0,646	0,747	7,4	4,3	3,1	2,4	10,9	6,3	4,8	3,3	18,7	12,9	8,2	6,5	26,9	20,2	14,5	12,4	C
0,461	0,553	0,636	0,757	10,3	7,5	4,7	3,0	12,4	10,8	7,3	4,2	18,9	15,6	11,2	7,2	30,0	27,3	17,0	13,7	C
0,461	0,515	0,609	0,772	11,0	8,8	5,8	3,3	15,1	12,0	8,0	5,0	19,5	14,6	11,8	7,7	24,7	21,8	15,7	11,2	C
0,463	0,530	0,625	0,786	15,2	11,1	7,3	4,0	17,8	15,3	10,8	7,0	24,0	18,4	14,2	10,1	28,8	24,9	19,4	13,3	C
0,463	0,530	0,652	0,800	11,5	9,0	5,6	3,7	18,3	13,5	8,2	5,5	26,2	18,5	12,8	8,6	30,7	24,0	17,8	12,1	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.3 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1959.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,474	0,543	0,639	0,772	7,6	5,8	3,6	2,4	9,7	7,0	4,8	3,5	15,2	11,4	8,4	5,7	25,7	21,1	15,7	10,8	A
0,479	0,562	0,664	0,818	6,6	4,3	2,7	1,5	11,3	7,5	4,7	2,4	17,8	13,5	10,4	6,5	25,8	20,1	15,2	10,4	A
0,456	0,549	0,650	0,759	10,3	6,1	3,9	2,8	13,3	8,7	5,5	4,0	20,2	15,3	10,2	7,4	28,6	21,4	15,5	12,4	A
0,456	0,524	0,623	0,730	8,9	6,5	3,5	2,3	10,9	8,0	5,2	3,6	20,4	16,1	10,0	7,7	26,5	22,5	17,6	12,3	A
0,456	0,536	0,609	0,730	7,1	5,0	3,3	2,1	11,5	7,9	5,8	4,2	17,6	12,8	10,5	6,9	28,9	22,0	18,6	12,7	A
0,456	0,537	0,623	0,759	9,4	6,0	3,7	2,1	13,5	9,4	5,8	3,1	18,5	13,9	10,0	7,0	29,8	22,8	17,9	13,2	A
0,456	0,523	0,623	0,759	7,3	5,5	3,1	1,8	12,7	8,9	5,7	3,2	22,9	18,1	12,0	7,8	30,5	25,7	18,1	13,2	A
0,478	0,562	0,650	0,789	11,5	7,7	5,2	2,6	15,0	10,6	6,3	3,7	25,1	18,1	13,2	7,3	31,7	27,7	20,1	14,2	A
0,467	0,549	0,650	0,832	9,0	6,2	3,5	1,8	12,5	8,4	5,2	2,5	20,3	13,8	9,8	5,6	26,6	18,3	15,7	8,2	A
0,456	0,524	0,623	0,774	10,8	7,5	4,9	2,9	15,0	10,1	7,5	4,2	21,6	17,6	11,4	7,7	30,4	25,5	18,4	12,1	A
0,456	0,524	0,623	0,774	11,1	8,7	5,3	3,2	12,7	9,5	6,4	3,7	20,1	15,9	11,1	6,6	27,0	21,9	18,1	12,6	A
0,474	0,556	0,652	0,800	10,4	6,8	4,7	2,6	15,9	10,1	7,7	4,4	23,2	20,1	14,3	8,7	31,3	25,2	19,3	14,8	B
0,463	0,524	0,609	0,759	10,5	7,6	5,4	3,1	16,2	12,1	8,3	4,9	22,6	18,0	14,5	8,6	28,7	25,7	18,3	13,9	B
0,478	0,562	0,664	0,788	11,9	8,7	5,6	3,9	14,4	10,9	7,2	5,7	20,9	18,9	12,6	7,8	28,1	20,7	15,6	10,8	B
0,467	0,549	0,650	0,745	13,2	10,7	6,9	4,1	15,9	11,9	8,0	6,0	24,7	18,1	12,9	9,8	29,1	23,1	16,2	12,0	B
0,456	0,537	0,637	0,730	12,2	9,2	5,5	3,6	16,1	11,6	7,8	5,7	23,4	17,3	13,5	9,1	30,8	24,3	18,1	14,5	B
0,456	0,524	0,650	0,744	7,5	4,1	2,8	1,3	10,9	7,4	3,9	2,6	24,2	18,7	10,9	7,1	34,6	29,7	20,0	15,2	B
0,456	0,524	0,623	0,745	7,0	4,0	3,1	1,4	12,1	7,5	6,0	3,0	20,3	14,5	9,1	6,8	28,1	24,5	19,1	14,9	B
0,456	0,524	0,623	0,774	8,5	6,0	3,6	2,1	10,4	7,9	5,2	3,1	17,8	13,7	9,3	4,9	28,4	22,5	17,4	12,2	B
0,467	0,549	0,637	0,774	10,3	6,2	4,3	2,1	13,2	9,5	6,3	3,3	26,3	19,3	14,8	8,9	32,8	29,4	23,4	16,9	B
0,467	0,537	0,637	0,803	9,8	7,2	4,6	2,3	14,2	11,0	7,5	3,3	23,8	19,2	13,2	6,9	29,8	26,4	21,2	11,1	B
0,467	0,537	0,650	0,803	10,6	8,0	4,8	2,2	16,3	12,1	7,5	3,8	24,0	19,2	13,1	8,6	32,7	27,4	19,2	13,7	B
0,467	0,537	0,623	0,774	11,6	8,4	5,5	3,1	16,8	11,9	8,0	4,7	20,7	18,1	13,7	8,3	28,8	25,9	20,1	14,0	B
0,463	0,556	0,666	0,815	11,9	8,7	4,8	3,2	15,3	10,4	6,8	4,1	20,6	15,4	9,1	6,2	28,9	23,2	16,0	10,5	C
0,456	0,524	0,609	0,759	12,4	8,4	5,6	3,8	18,2	11,0	7,6	5,4	21,3	15,9	11,4	7,6	29,1	23,5	17,8	10,5	C
0,478	0,562	0,664	0,774	15,5	10,7	7,9	5,4	17,8	13,9	9,8	6,6	21,8	16,0	11,7	8,0	27,1	20,0	14,5	10,4	C
0,467	0,549	0,650	0,759	10,3	7,0	4,7	3,5	13,5	9,0	6,2	4,6	18,0	11,9	9,2	6,0	19,5	14,3	11,2	8,2	C
0,456	0,537	0,637	0,745	14,6	10,4	6,9	4,2	16,9	12,2	8,3	5,3	23,3	17,3	13,3	9,0	29,6	23,5	14,6	12,4	C
0,456	0,524	0,622	0,730	8,1	6,0	3,3	2,4	10,5	7,7	5,1	3,1	19,5	12,5	10,5	7,7	29,4	23,2	18,8	12,3	C
0,456	0,524	0,623	0,759	7,2	6,4	4,0	1,9	12,5	10,0	6,1	4,1	18,7	14,7	9,1	5,9	27,6	22,3	18,4	13,1	C
0,456	0,524	0,623	0,774	8,0	5,9	3,4	2,5	12,0	8,1	5,7	3,4	19,6	14,7	10,6	6,2	29,1	23,6	17,6	10,7	C
0,467	0,537	0,609	0,745	10,3	7,7	5,4	2,7	11,9	9,6	6,9	4,6	19,3	14,3	10,7	7,7	24,7	19,1	16,2	10,3	C
0,456	0,537	0,637	0,803	8,4	6,5	3,9	2,0	10,5	7,5	5,2	2,8	19,2	15,1	9,4	5,4	28,4	19,6	15,4	8,8	C
0,456	0,523	0,622	0,767	13,0	9,1	5,3	3,0	15,9	11,8	7,4	4,0	19,4	15,5	10,9	6,8	28,5	22,4	16,5	12,9	C
0,456	0,524	0,623	0,774	10,5	8,5	5,3	3,2	12,8	9,2	7,4	3,9	17,6	13,4	8,8	5,1	24,3	19,7	13,3	8,6	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.4 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1960.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,467	0,537	0,623	0,774	9,5	6,8	4,3	2,3	12,9	9,7	6,5	3,7	20,4	16,1	11,6	6,0	26,9	22,3	17,9	10,2	A
0,471	0,564	0,674	0,808	7,8	5,2	3,5	2,0	11,4	7,4	4,9	3,1	15,3	11,2	7,7	4,7	22,2	18,4	13,9	8,8	A
0,482	0,564	0,674	0,808	8,3	6,2	3,5	2,2	11,3	8,1	5,0	3,1	15,4	13,2	8,3	5,1	27,2	20,7	14,0	11,3	A
0,460	0,539	0,620	0,751	8,8	6,0	4,0	2,2	14,9	10,3	7,0	3,9	19,7	12,7	10,3	5,4	27,0	20,2	15,4	9,4	A
0,471	0,551	0,661	0,779	5,8	4,0	2,3	1,2	11,1	9,6	5,3	3,5	16,7	14,0	8,5	6,0	29,1	21,7	16,4	12,0	A
0,471	0,551	0,674	0,808	7,2	4,8	2,7	1,8	10,7	7,0	4,8	2,6	18,0	12,9	8,7	5,3	28,5	21,7	16,3	11,6	A
0,471	0,539	0,661	0,808	6,9	4,9	2,8	1,5	11,1	7,5	4,5	2,6	19,2	15,1	8,9	5,5	30,9	25,2	19,3	13,4	A
0,471	0,539	0,647	0,779	6,1	4,3	2,7	1,5	8,8	7,4	5,0	2,6	16,2	12,9	7,7	5,5	25,4	18,5	12,8	9,3	A
0,472	0,551	0,674	0,793	5,9	4,4	2,4	1,8	9,2	6,4	3,7	2,6	17,1	12,9	7,7	5,4	28,0	22,4	15,6	11,7	A
0,471	0,539	0,647	0,765	1,1	5,3	3,1	2,2	10,4	7,7	5,2	3,0	15,7	13,0	9,6	7,3	21,5	19,1	16,3	11,7	A
0,482	0,564	0,687	0,793	7,7	5,1	2,7	1,9	13,1	8,3	5,1	3,0	19,3	13,4	9,7	7,1	30,5	23,1	15,8	11,9	A
0,482	0,564	0,687	0,807	9,3	7,2	3,8	2,3	14,5	10,1	6,3	4,0	21,6	15,6	9,9	6,2	34,2	26,1	19,6	14,0	A
0,479	0,549	0,650	0,803	9,3	6,8	4,0	2,1	12,9	9,4	6,5	3,0	23,1	16,4	13,0	8,7	30,0	25,2	19,9	14,2	B
0,482	0,564	0,688	0,808	12,9	8,3	5,0	2,7	16,1	10,7	7,0	4,2	21,1	17,2	12,3	7,7	28,0	20,7	16,5	11,6	B
0,482	0,564	0,674	0,808	9,3	6,9	4,0	2,3	13,8	9,9	6,1	3,5	21,1	16,4	12,5	8,6	28,6	22,1	18,5	13,1	B
0,471	0,551	0,661	0,793	6,4	5,1	3,0	2,2	10,5	7,7	5,1	3,5	20,7	18,3	11,3	8,2	31,9	24,7	18,2	13,9	B
0,471	0,539	0,647	0,779	8,1	6,4	3,8	2,0	16,2	13,5	8,6	5,1	22,6	16,1	11,4	7,3	30,2	26,4	18,9	15,1	B
0,471	0,539	0,607	0,737	12,2	9,2	6,9	3,5	13,9	11,4	7,9	4,5	21,7	19,3	14,6	9,8	30,4	26,2	22,7	17,0	B
0,471	0,539	0,647	0,793	14,6	9,6	5,8	3,2	17,3	12,1	7,9	4,2	23,8	18,5	13,7	8,9	30,3	25,8	21,1	15,3	B
0,460	0,527	0,647	0,751	8,3	6,9	4,5	2,3	11,7	9,6	6,5	4,2	19,8	16,5	11,8	7,3	28,4	28,8	18,9	14,5	B
0,482	0,564	0,674	0,822	8,0	6,1	3,9	2,4	11,5	9,0	6,3	3,9	17,7	13,6	10,6	5,8	24,8	20,1	17,1	12,7	B
0,493	0,564	0,661	0,780	7,7	5,8	4,2	1,5	12,5	8,3	5,8	3,6	18,7	13,1	10,3	7,4	27,8	21,5	15,6	13,6	B
0,471	0,551	0,647	0,793	7,7	4,7	3,6	1,7	11,0	7,4	5,2	2,4	20,0	14,2	12,1	7,1	28,0	21,9	17,1	11,7	B
0,471	0,564	0,687	0,822	10,9	6,7	4,0	2,1	14,4	9,3	5,8	3,5	22,0	16,6	12,1	7,1	27,8	22,0	15,2	11,2	B
0,467	0,537	0,664	0,817	8,2	6,5	4,1	2,7	11,4	7,7	5,6	3,6	20,2	14,0	9,4	5,9	21,9	18,1	12,0	8,2	C
0,471	0,552	0,674	0,793	9,1	6,7	4,4	2,6	12,2	9,2	5,8	3,8	16,8	11,7	8,4	5,7	25,5	15,9	12,9	9,5	C
0,482	0,564	0,674	0,794	14,3	10,2	6,7	4,6	17,2	12,9	9,0	5,5	22,9	16,6	12,0	8,3	30,4	25,2	17,1	12,2	C
0,460	0,527	0,607	0,737	9,4	7,2	4,9	3,1	12,5	10,6	7,7	4,9	16,0	12,6	9,6	6,1	24,2	18,0	14,8	9,4	C
0,471	0,551	0,634	0,765	11,8	9,1	6,1	3,6	15,8	11,7	9,1	5,1	22,1	16,9	12,8	8,5	29,3	22,9	17,4	12,6	C
0,471	0,551	0,674	0,808	12,7	8,4	5,0	3,1	16,6	12,0	7,1	4,4	24,4	17,1	11,8	7,3	31,7	25,9	17,1	13,3	C
0,471	0,551	0,647	0,779	8,0	5,9	4,3	2,6	12,4	9,6	6,4	4,0	18,8	14,6	9,9	6,8	27,3	23,3	19,3	13,1	C
0,471	0,551	0,661	0,793	10,3	7,4	4,5	2,9	12,9	10,0	6,3	4,0	20,5	16,5	11,2	6,9	28,4	23,5	15,3	9,7	C
0,482	0,564	0,674	0,822	12,9	9,5	6,2	3,5	16,3	13,1	8,2	5,3	21,4	17,8	12,5	7,8	29,4	25,7	18,9	12,9	C
0,471	0,539	0,634	0,779	10,8	9,2	5,0	2,7	15,8	12,1	7,8	3,9	21,3	16,4	11,1	6,9	29,0	24,0	18,5	12,9	C
0,482	0,564	0,674	0,822	12,4	8,9	5,5	2,9	15,6	11,0	7,3	4,2	22,0	14,9	10,8	6,9	28,4	21,5	16,3	10,2	C
0,471	0,564	0,701	0,822	12,6	8,1	4,6	2,9	15,4	10,3	6,0	4,2	18,4	15,6	9,9	5,9	29,0	21,5	15,0	10,7	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.5 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1961.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,471	0,551	0,660	0,836	11,5	7,9	4,7	2,7	15,2	9,8	6,4	3,7	19,2	15,1	9,2	5,7	27,5	24,0	15,5	10,2	A
0,471	0,551	0,687	0,836	12,1	7,7	4,0	2,5	14,5	10,1	6,2	4,1	23,2	16,0	10,1	6,1	34,0	26,1	16,7	10,2	A
0,471	0,551	0,674	0,836	11,5	7,8	5,1	3,1	15,3	10,3	7,2	3,6	21,4	15,3	10,4	6,4	28,6	23,0	15,3	10,0	A
0,471	0,564	0,687	0,836	9,6	5,7	3,3	2,0	13,0	9,5	5,3	3,0	22,2	16,4	9,5	6,1	30,1	24,1	17,6	11,5	A
0,482	0,564	0,647	0,779	8,7	6,3	3,7	2,4	12,2	8,2	5,7	4,3	20,8	14,5	10,4	6,9	26,6	22,0	17,2	12,2	A
0,482	0,564	0,674	0,793	9,6	5,6	3,4	2,1	13,4	8,9	5,1	3,3	22,4	18,0	10,9	7,7	27,3	21,3	16,3	11,8	A
0,482	0,577	0,661	0,793	8,6	5,7	3,8	2,6	13,4	9,8	6,9	4,1	19,3	15,9	10,3	7,0	33,6	23,5	17,2	12,1	A
0,493	0,564	0,661	0,779	10,2	7,2	4,7	2,6	15,6	10,3	7,1	3,7	22,2	16,6	13,0	7,9	30,9	23,4	19,0	12,5	A
0,482	0,564	0,674	0,808	7,3	4,7	3,3	2,2	11,6	7,8	5,2	3,5	18,0	13,6	9,9	7,1	28,4	23,0	18,2	12,1	A
0,493	0,589	0,701	0,836	7,7	4,2	1,9	1,2	11,0	7,5	4,3	2,1	16,9	11,2	7,2	5,2	22,6	16,0	10,8	8,6	A
0,471	0,551	0,661	0,808	9,6	7,1	3,7	2,3	14,5	11,9	6,5	4,2	22,0	16,0	10,7	6,8	29,7	24,0	17,5	12,2	A
0,437	0,501	0,593	0,708	10,1	7,0	4,6	2,8	13,2	9,4	6,7	4,7	20,8	16,8	11,9	7,8	32,4	23,3	17,8	13,1	A
0,471	0,551	0,687	0,850	12,1	8,1	4,7	2,5	15,0	11,0	6,9	3,1	21,6	16,0	10,1	7,0	26,0	21,7	16,5	10,7	B
0,471	0,551	0,647	0,779	12,2	9,0	6,0	3,5	16,4	10,7	7,4	4,8	20,4	15,6	11,3	7,6	29,6	25,5	18,1	13,1	B
0,460	0,551	0,674	0,836	11,6	7,5	4,4	2,4	16,6	10,8	7,2	4,2	25,1	19,7	11,6	8,2	31,1	23,3	15,4	11,1	B
0,471	0,551	0,674	0,807	13,4	9,2	5,3	2,9	15,4	12,4	9,2	3,6	23,7	18,1	12,8	8,1	25,1	21,6	15,3	12,3	B
0,471	0,551	0,661	0,822	12,9	7,7	5,0	2,7	17,2	12,1	7,6	5,6	22,6	18,5	13,5	8,3	30,2	24,1	18,7	12,9	B
0,493	0,577	0,661	0,822	9,3	6,7	4,8	2,9	14,9	10,4	8,2	5,2	19,4	16,1	13,2	8,2	33,3	26,7	21,6	14,6	B
0,471	0,551	0,647	0,808	11,1	7,4	4,8	2,6	14,6	11,3	7,0	4,2	21,8	17,6	11,9	7,7	30,8	26,4	19,3	13,4	B
0,460	0,539	0,647	0,779	10,5	7,1	4,9	2,6	15,2	11,5	7,5	4,4	23,2	19,7	13,7	9,6	30,5	25,3	19,6	14,6	B
0,471	0,551	0,660	0,793	8,8	6,2	4,5	2,7	13,4	9,8	7,0	4,7	19,8	15,5	12,5	9,0	26,6	21,8	16,6	13,8	B
0,471	0,564	0,660	0,822	8,2	5,4	3,5	1,8	12,9	8,3	5,6	2,6	20,0	14,3	10,6	6,2	27,7	20,6	15,5	9,8	B
0,460	0,539	0,647	0,779	10,9	8,7	5,2	3,2	16,0	10,9	7,5	4,4	24,0	17,8	13,0	8,7	29,2	26,2	20,1	14,9	B
0,449	0,501	0,580	0,666	8,4	6,7	4,5	3,0	13,4	11,0	7,7	5,2	26,5	18,8	14,9	12,0	31,2	25,7	18,6	16,4	B
0,482	0,564	0,701	0,850	9,9	6,7	3,9	2,7	12,3	8,6	5,7	3,4	17,1	13,4	8,2	4,8	24,8	19,8	13,6	9,6	C
0,471	0,551	0,687	0,836	11,7	8,9	4,7	2,8	14,2	9,3	5,9	3,8	18,2	13,3	8,1	5,7	27,2	19,9	13,9	9,8	C
0,471	0,551	0,674	0,836	11,7	8,1	5,8	3,3	15,1	11,9	7,4	4,5	20,8	16,2	11,3	7,6	28,4	23,5	18,0	10,8	C
0,471	0,551	0,674	0,807	13,3	10,6	5,8	3,8	17,0	13,2	7,9	5,1	21,6	15,0	11,1	7,5	28,9	22,1	14,4	11,0	C
0,471	0,551	0,661	0,822	13,5	9,1	5,5	3,9	17,7	11,7	7,5	5,8	22,1	16,5	12,4	7,7	35,1	23,4	18,9	13,4	C
0,482	0,564	0,647	0,793	8,9	6,6	4,6	2,5	12,7	8,7	7,3	4,5	17,5	13,8	11,2	7,6	28,3	21,1	15,6	12,5	C
0,471	0,539	0,633	0,793	9,7	7,0	4,2	2,4	13,3	9,2	6,0	3,5	19,3	15,9	10,9	6,5	29,0	24,7	17,6	11,6	C
0,472	0,551	0,661	0,793	7,8	5,4	3,8	2,6	10,8	8,1	5,7	3,7	16,9	14,6	10,2	6,6	25,2	20,2	16,3	12,8	C
0,471	0,551	0,660	0,793	7,3	5,5	3,6	2,2	12,2	8,6	5,4	3,6	19,1	12,9	8,9	7,3	23,8	19,4	14,9	9,6	C
0,471	0,564	0,674	0,822	9,2	6,1	3,3	2,0	12,4	8,5	5,4	3,0	18,2	12,9	9,2	5,5	27,3	18,5	12,0	9,3	C
0,471	0,539	0,647	0,793	8,6	7,5	4,4	2,4	13,0	9,7	7,6	4,2	18,2	13,4	11,3	6,3	24,1	20,1	14,1	9,5	C
0,471	0,570	0,654	0,779	12,6	8,4	5,9	3,6	17,3	12,3	8,1	5,3	22,6	15,1	11,1	7,3	27,4	20,2	16,6	12,2	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.6 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1962.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,471	0,551	0,660	0,822	8,8	6,1	3,6	1,9	11,9	9,0	6,3	4,0	14,0	11,0	8,1	4,8	21,0	18,5	13,2	9,6	A
0,493	0,589	0,701	0,836	9,6	6,0	3,6	2,4	14,3	9,1	6,1	3,5	20,7	14,8	10,3	6,8	28,1	20,5	15,8	11,0	A
0,482	0,564	0,674	0,822	12,0	8,7	5,0	3,2	16,1	11,8	7,4	4,8	22,4	16,1	11,5	8,3	31,1	25,0	16,9	13,8	A
0,471	0,551	0,660	0,822	9,4	6,9	4,5	2,3	13,3	9,1	6,0	3,2	18,6	12,9	9,4	5,4	25,1	19,4	14,9	9,8	A
0,471	0,551	0,660	0,793	7,7	5,6	3,5	2,0	10,7	7,9	5,0	2,9	19,1	13,8	9,9	6,1	28,2	21,5	16,2	11,6	A
0,471	0,551	0,647	0,808	8,8	5,7	4,0	2,1	12,9	8,6	6,7	3,5	19,7	14,0	11,1	6,2	29,0	23,6	18,2	12,4	A
0,471	0,551	0,647	0,793	9,1	6,6	4,9	2,6	14,6	9,6	7,3	4,1	21,6	14,5	11,8	6,8	30,5	25,0	19,7	12,4	A
0,471	0,551	0,660	0,822	9,8	7,2	4,3	2,4	11,9	9,6	5,9	3,5	18,8	14,1	10,8	5,5	32,6	23,3	18,1	10,6	A
0,479	0,570	0,674	0,836	7,2	4,9	3,4	1,6	9,7	6,5	4,4	2,7	15,1	12,5	8,0	5,1	25,8	20,2	15,8	10,5	A
0,471	0,551	0,647	0,808	10,1	6,7	4,2	2,0	15,8	11,8	7,1	4,4	20,8	16,4	12,3	6,6	28,0	21,4	18,3	11,6	B
0,471	0,539	0,660	0,793	12,6	8,2	4,6	2,6	19,3	13,5	7,0	4,5	27,3	20,4	15,5	7,4	31,5	24,5	20,1	12,9	B
0,493	0,576	0,687	0,822	13,1	9,3	5,9	3,2	16,9	12,2	8,6	5,1	25,0	19,6	13,9	9,9	29,8	24,6	18,8	14,0	B
0,471	0,551	0,647	0,793	12,7	9,5	6,3	3,5	19,1	13,7	9,2	5,9	25,4	20,2	14,2	9,5	31,6	26,1	21,5	14,1	B
0,471	0,551	0,660	0,822	12,1	7,7	4,9	2,2	15,3	11,2	7,1	3,8	24,7	18,1	13,5	9,7	31,0	25,7	20,4	14,1	B
0,471	0,552	0,660	0,808	10,4	6,9	4,1	2,2	15,3	11,7	6,8	4,2	22,8	18,8	12,2	7,9	31,4	26,3	19,9	13,9	B
0,471	0,551	0,647	0,793	7,4	4,5	2,7	1,5	11,4	7,7	5,0	2,5	20,8	14,9	11,8	6,9	28,3	24,4	19,4	13,8	B
0,460	0,539	0,647	0,751	9,7	7,2	4,3	2,7	13,2	10,3	6,3	3,6	20,6	13,2	10,2	6,5	27,0	22,4	17,7	11,4	B
0,471	0,551	0,634	0,779	12,3	8,4	5,5	2,9	17,1	11,8	8,4	4,2	25,0	20,1	15,8	8,6	30,2	24,6	20,7	13,6	B
0,471	0,551	0,660	0,808	11,7	8,3	5,3	2,9	16,2	12,9	7,8	4,5	25,8	17,7	12,4	7,2	31,1	23,5	18,1	11,3	B
0,471	0,551	0,633	0,808	9,1	6,6	5,2	2,6	13,7	10,2	6,1	3,4	20,2	16,2	12,1	6,8	27,1	20,8	17,5	10,2	B
0,468	0,554	0,656	0,796	12,8	8,3	5,5	3,8	16,9	11,8	7,7	4,8	22,4	18,2	12,9	10,1	27,9	25,5	19,3	15,9	B
0,471	0,551	0,660	0,822	9,9	7,6	4,0	2,6	12,9	10,5	6,9	4,2	17,4	15,3	8,5	6,2	28,2	20,7	13,6	9,7	C
0,471	0,551	0,687	0,808	13,5	10,2	5,4	3,7	16,4	13,0	8,2	5,4	22,4	17,4	12,2	7,5	28,9	22,6	17,5	12,1	C
0,482	0,576	0,687	0,836	13,4	8,8	5,9	3,2	15,3	10,7	7,1	4,4	20,3	15,6	9,7	6,2	28,0	22,2	16,0	11,7	C
0,471	0,551	0,647	0,793	9,6	6,4	4,0	2,7	13,4	8,9	5,7	3,8	16,7	12,0	8,1	5,3	23,5	20,6	14,1	9,4	C
0,471	0,551	0,660	0,822	9,7	6,1	3,9	2,6	12,7	8,4	5,2	3,0	16,1	11,3	7,6	4,6	25,7	20,3	13,4	8,6	C
0,471	0,552	0,660	0,808	8,7	5,9	4,3	2,3	13,4	8,7	6,3	3,5	19,8	15,8	10,5	6,7	28,4	21,4	16,8	11,7	C
0,471	0,551	0,660	0,822	11,0	7,4	5,0	2,5	15,1	9,9	6,6	3,8	20,3	15,0	10,1	6,4	29,4	23,2	18,5	12,0	C
0,471	0,551	0,660	0,793	10,2	6,6	4,1	2,4	15,9	10,7	7,5	4,5	27,9	19,6	14,8	9,1	32,8	26,6	21,2	14,8	C
0,471	0,551	0,647	0,808	11,4	7,9	5,3	2,9	14,9	12,2	7,5	5,0	22,3	17,0	12,1	7,0	33,7	24,6	19,0	12,1	C
0,471	0,564	0,660	0,822	8,7	6,5	4,0	2,5	11,8	8,0	5,2	3,3	17,8	11,1	8,1	5,1	28,1	18,6	14,1	9,7	C
0,471	0,551	0,647	0,822	10,2	7,7	4,4	2,4	12,9	10,2	6,4	3,9	19,5	16,0	11,5	6,2	32,9	22,7	17,8	12,5	C
0,474	0,555	0,687	0,813	12,3	8,5	5,8	3,2	15,6	10,7	7,7	4,4	22,0	15,2	11,3	7,1	29,7	23,3	18,3	13,1	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.7 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1963.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,482	0,576	0,674	0,822	8,2	4,9	3,0	1,6	10,6	6,7	4,2	2,6	17,5	12,3	8,0	5,0	26,0	19,6	14,0	9,8	A
0,495	0,555	0,649	0,810	8,6	6,2	4,0	2,0	11,3	9,4	5,6	2,8	16,9	14,8	10,2	5,7	24,8	19,7	15,3	11,1	A
0,497	0,580	0,663	0,807	7,9	4,8	3,3	1,9	10,4	7,3	4,8	3,0	15,5	10,4	7,8	5,1	26,5	18,6	13,9	9,3	A
0,502	0,580	0,694	0,836	5,9	3,8	2,8	1,8	7,6	5,9	4,1	2,6	13,9	10,2	7,7	4,5	21,9	16,8	14,6	9,6	A
0,488	0,570	0,653	0,808	8,6	5,9	3,8	2,1	11,7	7,9	5,6	3,0	16,0	11,9	7,9	5,1	25,4	19,3	14,2	7,8	A
0,471	0,564	0,647	0,779	6,3	4,0	2,6	1,7	9,4	6,0	4,3	2,9	16,1	11,0	7,8	5,1	26,0	19,1	14,2	10,2	A
0,471	0,542	0,633	0,762	4,7	3,4	2,4	1,5	6,9	4,9	3,2	2,3	11,4	6,1	5,5	3,4	20,4	16,8	12,9	8,7	A
0,471	0,551	0,661	0,808	7,1	4,9	2,8	1,2	9,6	7,1	5,0	2,6	16,0	12,6	8,1	6,5	26,0	20,7	14,4	11,3	A
0,482	0,576	0,674	0,836	5,9	3,8	2,5	1,2	7,5	4,6	2,7	1,8	10,1	7,9	5,4	3,2	20,4	17,9	12,4	7,7	A
0,493	0,589	0,701	0,864	6,3	4,3	2,8	1,8	10,0	6,6	4,3	2,4	14,9	9,6	7,0	3,7	23,3	18,5	13,8	9,2	A
0,490	0,576	0,681	0,843	5,8	4,2	2,8	1,5	8,2	5,6	3,6	1,9	13,0	8,2	5,7	3,3	22,5	17,2	14,2	8,8	A
0,471	0,576	0,674	0,808	9,3	6,0	3,7	2,4	12,0	8,0	5,3	3,2	17,2	10,7	7,7	4,7	26,1	18,2	13,9	9,6	A
0,482	0,564	0,674	0,822	12,4	8,6	5,6	3,0	16,2	12,4	8,3	5,1	23,5	18,3	12,4	8,6	30,2	23,2	17,4	11,8	B
0,493	0,564	0,661	0,815	11,5	8,0	5,5	2,7	14,6	11,1	7,8	4,1	22,7	18,3	13,6	8,1	28,3	22,7	18,2	12,2	B
0,465	0,551	0,633	0,737	12,5	8,7	5,9	4,3	14,8	10,3	7,9	5,6	20,3	16,2	11,5	10,4	27,4	20,3	17,0	12,6	B
0,480	0,555	0,655	0,807	10,9	8,0	5,1	2,6	15,2	11,9	7,8	4,4	21,1	17,4	13,3	9,1	28,0	21,8	18,1	13,1	B
0,482	0,558	0,627	0,765	12,1	8,7	5,9	3,7	16,5	12,6	9,1	5,7	21,2	16,5	13,5	8,7	26,9	21,0	18,5	12,6	B
0,471	0,551	0,647	0,774	13,7	7,1	4,0	2,3	15,1	9,7	6,8	3,4	21,8	16,9	12,2	8,2	29,1	23,0	17,3	12,4	B
0,471	0,539	0,627	0,765	10,6	8,2	5,1	3,6	13,6	10,9	7,4	5,0	22,6	19,1	14,6	9,1	28,1	23,6	18,4	12,5	B
0,448	0,520	0,634	0,779	11,0	8,6	5,0	2,8	13,7	12,2	8,1	3,9	22,6	19,6	11,7	8,0	25,9	22,3	18,3	10,8	B
0,476	0,564	0,647	0,793	8,4	6,0	4,1	2,6	12,0	8,7	6,0	3,8	20,9	17,4	11,5	8,4	28,8	23,1	18,0	12,4	B
0,493	0,583	0,687	0,822	10,8	6,9	4,4	2,6	16,2	11,5	7,3	4,1	22,9	14,8	11,9	7,3	27,3	22,5	17,0	11,1	B
0,482	0,551	0,660	0,836	12,6	10	9,2	3,6	15,4	13,7	9,7	4,5	21,3	18,8	14,0	7,7	27,4	23,4	17,5	11,4	B
0,449	0,539	0,660	0,765	10,1	8,0	4,4	2,9	16,9	12,2	8,1	5,0	24,3	16,9	12,6	8,8	29,2	21,9	16,3	12,3	B
0,482	0,576	0,660	0,836	14,5	9,0	6,7	3,6	16,4	11,5	8,1	4,5	21,1	15,5	11,2	7,7	29,2	22,9	17,0	12,0	C
0,497	0,562	0,681	0,822	8,7	6,9	4,0	2,6	11,7	9,2	5,6	3,6	18,9	15,1	10,1	6,7	27,9	24,7	17,4	12,1	C
0,471	0,564	0,674	0,807	12,9	8,5	6,3	3,7	16,1	11,4	8,2	4,9	22,3	15,4	11,5	8,2	28,6	21,6	16,0	12,2	C
0,489	0,576	0,690	0,826	8,5	5,5	3,7	2,2	10,6	7,8	5,2	3,0	16,6	11,6	8,5	5,4	25,2	19,7	14,7	10,0	C
0,469	0,558	0,620	0,772	10,1	6,0	4,3	2,5	14,2	9,6	7,1	4,0	20,5	14,6	13,2	7,7	29,5	22,6	19,8	13,5	C
0,471	0,551	0,647	0,793	8,8	5,5	3,5	2,0	11,0	7,8	5,0	2,6	18,0	13,1	9,6	5,9	27,1	20,1	17,3	10,9	C
0,471	0,551	0,654	0,808	11,3	7,6	4,7	2,6	14,5	9,1	6,2	3,1	22,9	17,0	11,3	6,9	30,1	25,1	19,3	12,3	C
0,471	0,551	0,661	0,793	7,5	5,5	3,9	2,0	12,8	8,9	5,4	3,0	22,0	16,4	10,4	6,2	30,2	24,1	17,4	9,8	C
0,493	0,570	0,650	0,793	8,1	6,3	4,3	2,6	11,6	9,9	5,8	4,1	18,8	15,0	11,2	7,1	29,7	23,3	20,0	12,9	C
0,471	0,576	0,674	0,836	10,6	6,9	4,7	2,6	15,0	10,3	7,1	4,0	21,1	14,7	10,7	5,8	32,1	21,9	16,7	10,9	C
0,460	0,539	0,633	0,808	11,8	8,2	5,1	2,4	15,5	12,6	7,8	3,8	22,7	18,4	12,6	6,6	33,1	26,3	20,2	12,6	C
0,471	0,564	0,660	0,808	13,1	8,4	6,1	3,6	16,2	11,3	7,9	4,6	22,2	16,7	11,7	6,6	30,9	24,8	16,8	11,2	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.8 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1964.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,505	0,589	0,687	0,836	7,2	4,7	3,7	1,8	9,3	6,9	4,9	3,0	13,7	9,9	6,9	3,7	21,1	17,5	12,9	8,2	A
0,481	0,576	0,687	0,850	5,6	3,8	2,3	1,5	8,0	5,6	3,1	1,8	11,6	7,9	5,2	2,6	22,1	16,2	10,4	5,7	A
0,496	0,590	0,694	0,892	6,7	4,6	3,2	2,2	9,0	7,2	4,7	3,2	15,8	12,6	7,3	4,2	24,2	19,2	13,9	8,7	A
0,482	0,564	0,661	0,836	8,4	5,9	3,4	1,7	10,9	8,1	5,3	2,9	16,9	13,0	8,2	4,7	25,1	18,5	15,2	9,5	A
0,505	0,589	0,687	0,850	4,5	3,1	2,2	1,1	6,6	5,1	3,7	1,7	12,6	8,1	5,4	3,7	20,1	16,2	11,8	7,5	A
0,497	0,589	0,701	0,836	3,7	2,2	1,3	0,9	6,0	3,8	2,6	1,5	11,5	7,3	4,3	2,6	22,2	15,7	9,9	7,3	A
0,482	0,564	0,674	0,822	6,8	4,2	2,6	1,6	8,9	6,0	3,6	2,3	16,0	11,3	7,4	3,9	25,2	18,3	14,0	8,8	A
0,471	0,551	0,660	0,793	3,3	2,1	1,3	0,7	5,3	3,0	1,9	1,2	9,2	5,9	3,9	2,5	15,1	12,7	10,8	7,3	A
0,471	0,564	0,674	0,807	3,8	2,4	1,8	0,9	6,1	4,1	2,7	1,7	10,2	6,9	4,6	2,9	18,3	14,8	9,2	7,4	A
0,460	0,545	0,640	0,786	6,8	4,6	3,0	1,7	8,8	6,6	4,1	2,4	14,7	10,7	7,7	4,4	25,1	20,0	15,4	10,5	A
0,460	0,564	0,660	0,808	6,4	3,8	2,4	1,5	8,4	5,7	3,3	1,9	13,6	8,9	6,4	3,4	24,4	17,9	13,3	8,7	A
0,460	0,545	0,660	0,779	6,5	4,1	2,6	1,7	9,0	6,0	3,9	2,4	17,3	12,2	7,7	5,3	31,4	22,3	15,9	10,9	A
0,505	0,570	0,687	0,843	11,0	8,9	5,9	3,4	14,5	11,7	8,4	4,5	18,1	16,9	11,6	7,2	24,9	21,1	15,5	11,7	B
0,505	0,576	0,674	0,836	11,2	8,5	5,7	2,9	13,3	10,7	7,9	4,7	18,7	14,2	10,1	6,8	22,0	17,8	13,7	9,4	B
0,471	0,564	0,674	0,836	12,1	8,0	4,9	2,8	14,5	9,7	6,4	4,3	20,3	15,3	11,1	6,6	23,6	17,7	13,3	8,5	B
0,505	0,589	0,687	0,836	10,2	7,6	5,2	3,0	14,0	10,8	7,5	4,7	19,7	15,4	11,0	6,6	24,3	19,7	14,5	9,1	B
0,505	0,589	0,674	0,822	10,5	6,9	4,7	3,1	12,9	10,3	6,4	3,8	19,0	14,6	12,3	7,5	26,6	20,7	17,6	11,3	B
0,493	0,576	0,674	0,808	9,0	5,8	4,0	2,4	12,9	8,9	5,9	4,0	18,7	15,1	10,9	6,5	26,4	21,3	14,8	11,4	B
0,482	0,564	0,661	0,822	8,5	5,8	3,5	2,0	12,0	8,4	5,6	2,7	19,4	14,3	10,5	6,3	24,0	18,7	15,5	11,0	B
0,488	0,564	0,660	0,793	9,0	6,0	3,6	2,2	11,7	9,2	5,2	3,3	20,3	14,2	10,5	7,3	29,1	21,1	16,6	12,4	B
0,482	0,564	0,674	0,807	8,1	6,0	3,7	2,5	14,0	8,6	6,9	4,5	19,5	14,7	10,8	9,2	23,6	18,6	14,7	10,0	B
0,471	0,551	0,654	0,793	9,6	7,3	5,4	2,7	12,8	10,5	7,3	3,8	18,8	13,9	11,0	7,0	24,0	19,3	16,0	11,1	B
0,460	0,539	0,634	0,780	13,6	10,5	6,9	4,5	17,3	13,2	9,4	6,3	23,0	18,5	14,6	9,3	29,3	23,1	18,5	13,5	B
0,471	0,564	0,674	0,794	12,9	8,8	5,3	3,5	15,5	11,2	7,5	4,8	22,8	18,5	12,9	9,1	28,1	24,4	17,4	12,9	B
0,480	0,576	0,681	0,836	10,6	7,1	4,9	2,5	14,5	9,6	7,3	3,6	22,9	15,4	11,6	5,4	34,3	24,2	19,0	12,5	C
0,505	0,570	0,674	0,836	10,9	8,1	5,8	3,0	13,0	10,7	7,7	4,0	19,6	16,4	10,8	5,4	28,2	23,2	17,5	10,4	C
0,494	0,576	0,687	0,864	7,7	4,9	3,1	1,7	11,5	7,7	4,7	2,6	19,8	12,9	11,6	5,1	28,6	23,1	15,8	10,3	C
0,483	0,558	0,654	0,836	7,2	4,8	3,2	1,6	11,3	8,3	6,0	2,5	18,4	14,3	10,0	5,0	24,9	20,5	15,4	10,1	C
0,471	0,558	0,661	0,836	5,5	3,8	2,6	1,3	8,5	5,4	3,6	1,9	14,8	11,5	7,5	4,0	25,4	19,2	14,7	8,2	C
0,505	0,589	0,687	0,836	4,6	2,9	2,3	1,4	7,3	4,7	3,6	2,2	14,3	10,5	7,7	4,3	22,1	18,5	13,4	8,5	C
0,482	0,577	0,687	0,850	5,1	3,3	2,2	1,1	8,0	5,0	3,0	1,7	15,9	10,7	7,1	4,0	23,7	17,9	11,9	8,6	C
0,471	0,551	0,660	0,822	7,6	5,6	3,3	1,8	12,6	8,9	5,7	2,9	20,8	14,1	10,8	5,5	28,4	22,3	16,7	11,4	C
0,493	0,589	0,701	0,807	7,6	4,4	3,0	2,1	9,9	6,7	4,3	3,0	17,9	14,2	8,2	6,4	26,6	20,4	13,5	10,6	C
0,457	0,539	0,647	0,793	7,6	4,9	3,7	2,0	11,0	8,4	5,0	2,8	20,2	15,7	9,9	5,9	31,1	23,3	17,0	10,3	C
0,448	0,526	0,634	0,766	7,7	4,9	3,0	2,0	12,4	7,5	5,6	3,1	23,2	16,0	10,9	7,7	29,5	24,9	17,5	13,2	C
0,471	0,551	0,674	0,836	7,4	5,7	3,4	1,9	11,4	7,8	4,8	2,1	19,4	14,1	8,9	4,7	28,1	22,8	14,7	9,5	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.9 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1965.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,448	0,539	0,647	0,794	7,7	5,0	2,7	1,8	10,7	6,7	4,2	2,5	17,6	12,1	7,4	4,0	27,5	21,4	15,1	8,8	A
0,460	0,545	0,660	0,808	9,9	6,5	5,4	2,4	14,4	9,8	6,4	2,9	20,4	14,3	9,4	5,7	29,1	24,4	17,4	11,3	A
0,471	0,557	0,654	0,794	7,2	5,4	3,2	1,7	10,6	7,8	4,7	2,8	18,1	12,8	7,7	4,4	32,9	25,7	17,4	10,0	A
0,465	0,551	0,654	0,800	8,4	5,6	3,8	2,0	11,9	8,2	5,3	2,9	21,0	16,5	11,0	6,2	28,8	23,2	16,9	11,6	A
0,454	0,532	0,626	0,794	7,7	5,8	3,6	2,2	10,9	8,3	5,4	3,1	20,5	14,7	11,4	6,7	28,7	23,4	18,3	11,4	A
0,471	0,557	0,660	0,814	7,2	4,7	3,1	1,8	11,7	7,4	5,3	2,9	20,2	14,8	10,0	6,0	31,6	23,6	17,7	10,1	A
0,454	0,539	0,647	0,800	7,5	5,0	2,6	1,6	11,7	7,7	4,8	2,6	19,6	14,8	9,4	5,4	30,5	21,7	14,9	9,6	A
0,452	0,532	0,640	0,779	9,9	7,4	4,4	2,5	13,6	9,5	7,0	3,7	20,6	14,5	10,6	5,6	29,2	25,5	21,6	13,9	A
0,460	0,539	0,634	0,794	12,3	9,4	6,1	3,8	16,2	12,5	8,3	5,5	23,5	18,6	13,6	9,2	28,4	23,2	19,1	12,9	B
0,480	0,551	0,647	0,822	12,4	9,5	6,2	2,9	15,4	13,8	8,8	4,8	22,4	19,7	14,6	8,2	27,9	23,8	18,5	11,5	B
0,471	0,551	0,647	0,779	11,9	9,0	5,9	3,8	15,8	11,5	8,1	5,1	24,3	18,5	14,8	9,5	28,6	22,8	17,9	13,1	B
0,477	0,545	0,626	0,786	11,8	9,1	7,1	3,7	14,2	10,7	8,5	4,6	21,5	17,0	12,9	8,0	29,0	23,1	18,3	11,5	B
0,460	0,532	0,634	0,779	14,2	9,8	6,4	2,8	18,1	12,0	9,6	6,2	22,0	17,6	13,1	9,3	28,9	22,0	20,1	12,9	B
0,482	0,555	0,660	0,814	11,0	9,2	7,6	3,7	16,1	11,5	10,3	4,6	22,1	18,1	14,0	8,2	29,4	22,7	18,8	12,7	B
0,448	0,545	0,640	0,786	11,6	7,9	5,3	3,0	15,2	11,4	7,6	4,8	22,9	14,6	11,5	7,9	29,5	21,9	17,0	11,2	B
0,465	0,577	0,674	0,822	13,9	9,2	6,0	3,4	19,3	12,3	7,6	4,7	21,4	15,9	12,5	8,4	31,0	21,5	18,3	13,6	B
0,477	0,564	0,660	0,808	12,1	8,3	6,1	4,0	14,9	11,4	8,1	5,0	18,8	16,0	12,0	9,5	27,3	22,1	18,0	14,2	B
0,477	0,570	0,667	0,794	15,8	9,7	7,2	4,5	18,0	12,3	8,7	6,3	21,7	18,7	12,5	8,6	29,3	23,6	18,8	13,7	B
0,475	0,545	0,647	0,779	11,9	9,0	6,0	3,3	15,6	12,2	9,2	5,8	22,3	17,1	12,0	9,1	30,8	24,4	17,4	13,5	B
0,482	0,564	0,660	0,808	15,1	10,5	7,1	4,4	17,7	13,1	9,4	6,1	23,1	18,4	14,1	9,5	28,2	22,6	19,3	13,4	B
0,448	0,514	0,620	0,765	7,6	5,7	3,5	1,9	10,5	8,0	4,4	2,4	20,4	14,8	9,3	5,1	31,1	24,0	16,6	10,0	C
0,452	0,539	0,647	0,779	9,5	6,2	3,4	2,3	13,2	7,3	4,7	3,1	19,4	13,3	8,3	5,2	26,4	18,7	15,1	8,1	C
0,460	0,545	0,660	0,794	9,8	6,1	3,5	2,1	13,4	8,9	5,8	3,4	22,2	14,9	10,5	6,6	32,5	23,2	17,7	10,8	C
0,477	0,551	0,647	0,822	9,7	7,0	4,9	2,6	12,5	9,4	6,7	3,4	20,7	16,4	10,8	5,9	29,1	23,7	17,9	9,1	C
0,460	0,545	0,647	0,822	5,7	4,3	3,0	1,5	8,6	6,4	4,4	2,5	17,7	13,3	9,1	4,8	27,0	20,3	15,0	8,9	C
0,471	0,557	0,660	0,836	6,1	4,8	2,9	1,8	8,7	6,4	4,1	2,5	16,7	12,7	9,0	6,0	25,5	20,8	15,4	10,7	C
0,465	0,551	0,654	0,808	7,8	5,0	2,9	1,7	10,2	7,1	4,3	2,4	18,6	12,3	8,1	5,4	25,2	21,9	14,4	9,4	C
0,471	0,577	0,674	0,822	5,0	3,3	2,5	1,3	7,9	5,2	3,6	2,5	14,6	11,5	7,7	4,9	28,2	20,9	15,8	10,0	C
0,471	0,551	0,660	0,808	5,7	3,5	2,5	1,6	8,0	5,8	4,1	2,6	17,0	11,9	7,9	5,8	24,0	18,7	13,9	10,0	C
0,460	0,545	0,647	0,822	7,8	5,7	3,6	2,0	11,5	8,1	5,3	2,5	18,7	13,2	8,8	4,6	27,6	20,8	16,0	9,6	C
0,465	0,545	0,654	0,794	8,7	5,5	3,5	2,1	11,5	7,0	4,9	2,6	19,0	13,7	8,2	5,0	24,9	19,1	14,4	9,7	C
0,471	0,564	0,660	0,808	7,8	4,6	2,9	1,6	11,3	7,6	5,1	2,8	17,1	13,0	8,4	5,2	26,9	20,0	14,5	8,1	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.10 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1966.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,482	0,557	0,660	0,814	13,1	9,0	6,5	3,8	15,2	12,9	8,9	5,0	23,5	18,7	12,9	7,8	30,5	25,7	19,8	13,5	A
0,460	0,545	0,660	0,822	8,6	5,5	3,5	1,8	12,9	8,1	5,2	2,6	18,2	13,7	8,6	4,9	30,5	25,5	18,1	11,8	A
0,490	0,589	0,681	0,836	10,0	6,8	4,4	2,6	11,9	8,2	5,6	3,5	16,0	12,3	9,3	5,7	21,9	17,5	15,0	9,7	A
0,477	0,551	0,660	0,808	10,6	6,3	4,1	2,4	12,9	8,5	5,6	3,6	17,9	13,0	7,9	4,8	26,7	19,4	14,9	8,9	A
0,460	0,545	0,654	0,808	6,5	4,8	2,9	1,7	9,3	7,4	4,5	2,5	17,6	13,3	8,4	5,0	29,2	23,3	16,8	9,8	A
0,471	0,557	0,667	0,822	8,6	6,1	3,8	2,0	13,8	9,8	5,9	3,5	20,7	15,7	11,1	5,6	31,6	26,9	19,5	12,1	A
0,471	0,557	0,660	0,822	9,7	6,8	4,1	2,1	13,4	9,8	6,4	2,7	20,5	13,9	8,1	4,8	26,1	19,6	12,9	9,3	A
0,471	0,551	0,660	0,822	9,8	7,7	4,9	2,3	10,8	8,4	5,9	3,2	18,1	12,1	9,3	5,1	27,2	22,7	16,5	10,0	A
0,471	0,551	0,660	0,822	12,1	9,2	5,8	2,8	14,3	11,4	7,9	4,3	18,9	14,3	10,3	6,4	27,6	22,2	18,2	10,2	A
0,460	0,545	0,660	0,836	7,7	5,6	3,4	1,8	12,9	8,7	5,7	3,1	18,5	12,5	8,3	5,1	25,1	20,3	14,2	8,9	A
0,471	0,551	0,660	0,822	8,2	5,6	3,5	1,7	10,0	6,5	4,1	2,4	14,7	10,9	8,3	4,6	24,3	18,1	12,2	8,8	A
0,471	0,551	0,660	0,822	4,9	2,9	1,5	1,0	7,4	5,6	2,9	1,7	13,6	10,3	5,5	3,1	23,9	18,3	10,9	8,5	A
0,477	0,551	0,674	0,794	15,2	12,2	8,4	5,3	18,4	14,1	10,6	7,1	20,7	17,6	12,4	8,4	26,8	22,0	15,7	12,4	B
0,493	0,595	0,681	0,836	13,9	10,5	8,4	5,0	18,4	12,6	10,6	6,5	22,6	17,1	14,0	8,6	26,2	19,0	16,1	11,7	B
0,465	0,551	0,681	0,822	13,6	9,8	6,0	3,6	17,5	12,3	9,0	4,4	22,3	18,2	13,5	7,7	28,7	23,3	17,2	12,6	B
0,482	0,564	0,660	0,794	11,9	8,2	5,0	3,1	16,0	11,4	7,4	5,0	20,6	16,8	13,1	7,8	26,6	21,2	16,9	11,9	B
0,477	0,545	0,660	0,808	10,6	7,7	4,5	2,3	15,2	11,7	7,5	4,0	21,5	18,4	12,5	7,7	28,5	23,2	17,2	11,7	B
0,465	0,557	0,647	0,822	11,4	7,4	4,9	2,4	14,8	10,6	7,2	3,7	23,3	18,0	13,4	7,8	28,0	20,8	17,2	11,0	B
0,471	0,557	0,667	0,822	12,2	8,1	5,5	2,6	15,4	10,9	7,1	3,6	22,3	17,1	11,4	6,2	28,2	22,3	17,5	11,2	B
0,465	0,545	0,647	0,822	7,6	4,5	3,0	1,3	12,5	7,9	5,2	2,5	21,2	16,7	10,5	5,9	29,2	22,5	18,1	11,4	B
0,460	0,545	0,647	0,822	9,3	7,0	4,3	2,0	13,8	9,8	5,7	3,3	20,1	16,4	10,8	5,9	27,3	19,7	16,9	10,7	B
0,471	0,551	0,680	0,836	8,0	6,4	3,7	2,0	13,6	10,0	6,1	3,4	20,7	15,4	11,5	6,7	26,8	20,0	17,0	10,2	B
0,471	0,551	0,660	0,822	8,5	6,1	3,4	1,7	14,3	10,9	6,5	3,1	18,7	15,0	10,8	6,9	23,6	19,8	15,8	10,3	B
0,471	0,551	0,660	0,822	11,0	8,4	5,2	2,0	14,9	11,2	7,6	3,7	20,1	14,3	11,0	6,4	22,8	19,1	13,6	9,9	B
0,471	0,551	0,654	0,808	7,2	5,4	3,6	2,4	11,0	7,9	6,3	3,5	17,8	15,0	9,9	6,7	29,8	25,6	18,4	11,8	C
0,471	0,545	0,660	0,822	12,2	8,8	5,6	2,6	15,2	11,7	6,9	3,7	22,0	17,1	10,6	6,1	32,2	23,4	16,2	10,5	C
0,471	0,564	0,667	0,808	9,3	6,1	4,5	2,6	12,8	8,9	6,4	4,1	19,7	12,9	9,9	6,3	27,3	18,8	14,6	9,2	C
0,465	0,564	0,660	0,822	6,5	3,5	2,3	1,3	9,1	6,5	4,2	2,6	14,9	11,5	7,9	3,9	22,8	16,3	11,6	7,4	C
0,465	0,551	0,667	0,822	8,3	4,9	2,8	1,4	11,1	7,6	4,6	2,5	18,8	12,3	9,1	4,8	29,3	21,8	16,5	9,3	C
0,465	0,545	0,654	0,822	5,7	3,5	2,5	1,3	8,5	5,4	3,5	1,8	13,3	9,6	6,7	3,6	22,0	17,3	12,1	7,6	C
0,460	0,545	0,647	0,822	4,6	3,2	2,0	0,9	7,7	5,6	3,5	1,6	18,1	12,5	8,1	4,2	26,9	18,7	13,6	7,8	C
0,460	0,545	0,647	0,822	6,4	3,9	2,5	1,3	9,3	6,5	4,3	2,4	17,1	10,7	7,9	4,7	23,7	17,6	12,1	8,0	C
0,460	0,545	0,660	0,836	6,6	4,6	2,6	1,5	11,9	8,4	5,1	2,7	15,0	11,7	6,7	4,2	21,9	17,1	13,0	7,7	C
0,460	0,545	0,660	0,822	6,9	4,3	2,7	1,6	11,8	8,3	4,8	2,6	16,1	12,0	6,9	3,9	24,4	20,0	12,5	8,0	C
0,460	0,545	0,660	0,822	6,2	4,0	2,5	1,3	9,3	6,5	3,5	2,4	16,6	11,0	6,9	4,1	23,3	16,4	11,1	6,8	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.11 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1967.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,460	0,545	0,647	0,836	5,6	3,8	2,5	1,1	9,2	7,3	4,5	2,2	14,7	11,3	6,5	3,3	20,5	16,5	12,1	7,6	A
0,477	0,570	0,681	0,850	6,7	4,4	2,6	1,5	9,9	6,6	4,2	2,5	14,7	11,8	6,2	3,7	22,1	16,7	12,4	8,0	A
0,471	0,557	0,674	0,842	7,3	5,2	3,3	1,4	9,0	6,6	4,5	2,3	13,5	10,4	6,9	4,1	21,1	17,4	12,3	7,3	A
0,482	0,578	0,682	0,850	9,2	7,2	3,7	1,7	13,2	9,5	5,2	3,1	17,3	13,2	7,5	4,6	23,8	18,3	14,3	8,5	A
0,460	0,545	0,647	0,808	9,2	6,1	4,7	2,9	11,8	8,6	7,0	3,3	17,8	12,1	9,5	5,5	23,1	17,6	14,4	8,7	A
0,460	0,551	0,660	0,822	8,4	5,1	2,6	1,6	12,0	7,8	4,8	2,6	18,9	12,4	7,7	4,1	27,5	20,3	14,1	9,5	A
0,443	0,520	0,634	0,751	8,7	5,8	3,7	2,1	12,5	9,3	5,9	3,4	22,0	16,2	10,6	7,1	29,6	23,7	16,9	11,2	A
0,437	0,520	0,613	0,772	11,0	8,1	5,1	2,5	15,6	11,2	7,3	3,5	22,2	17,0	11,3	5,6	31,4	26,0	18,6	12,9	A
0,448	0,539	0,654	0,808	6,5	3,6	2,4	1,2	8,5	5,5	3,3	1,7	14,7	8,6	6,1	3,4	25,3	19,1	13,0	8,6	A
0,412	0,523	0,627	0,800	12,3	7,8	4,6	2,0	15,9	10,0	6,1	3,4	25,8	16,6	11,4	6,5	35,9	27,6	21,2	14,5	A
0,412	0,514	0,623	0,793	11,0	6,9	3,9	2,3	16,2	10,6	5,6	3,2	23,0	15,2	9,4	5,3	34,0	26,0	18,1	12,2	A
0,415	0,520	0,634	0,800	10,0	5,5	3,2	1,5	11,2	7,3	4,4	2,2	22,5	15,1	9,5	4,9	34,3	25,9	17,4	10,2	A
0,471	0,551	0,660	0,822	11,0	8,2	5,0	2,4	13,7	10,2	6,5	3,1	19,9	16,1	10,8	6,5	24,5	19,0	14,7	10,2	B
0,471	0,564	0,674	0,850	9,8	7,5	4,3	2,0	13,7	10,3	7,0	3,3	20,2	15,0	9,7	6,7	25,5	18,4	12,9	9,5	B
0,471	0,577	0,667	0,836	10,2	6,9	4,1	2,2	14,4	11,0	6,4	3,5	16,2	13,3	10,2	6,2	22,0	18,0	13,3	8,6	B
0,482	0,578	0,685	0,850	11,7	8,2	3,9	2,2	15,0	11,1	6,8	4,0	20,0	15,0	10,7	7,0	27,2	19,5	15,5	10,7	B
0,465	0,551	0,654	0,836	10,8	9,6	4,8	2,4	14,3	9,6	7,1	3,0	20,1	13,8	10,4	5,9	26,7	21,1	15,6	10,5	B
0,477	0,564	0,674	0,836	9,4	5,6	3,1	1,6	13,3	7,7	4,3	2,4	22,9	15,1	9,8	4,9	27,6	20,3	13,7	8,7	B
0,454	0,533	0,634	0,779	7,5	4,8	2,9	1,6	12,5	8,9	5,7	2,9	19,8	15,3	10,3	5,6	29,1	23,2	16,4	10,9	B
0,460	0,539	0,610	0,751	10,2	6,5	4,3	2,3	13,1	10,4	8,3	5,3	21,6	15,9	11,8	8,1	30,8	23,4	18,2	12,7	B
0,454	0,532	0,647	0,808	10,7	7,5	4,2	2,1	14,2	9,7	5,8	2,9	23,7	16,1	11,0	6,0	30,0	23,3	16,7	11,3	B
0,409	0,514	0,613	0,786	16,6	11,1	7,3	3,2	23,2	16,3	9,8	6,0	32,6	24,5	17,0	11,1	39,0	31,4	25,1	15,6	B
0,426	0,520	0,624	0,794	15,5	9,9	6,6	4,2	19,3	13,7	9,7	4,6	27,1	21,8	15,8	10,0	35,9	26,0	21,4	15,7	B
0,415	0,520	0,627	0,800	13,2	6,9	4,2	2,2	17,8	11,8	7,5	3,3	31,0	21,3	14,0	8,5	36,3	27,9	20,2	13,9	B
0,471	0,551	0,660	0,836	6,1	4,1	2,4	1,4	9,9	6,0	3,9	1,9	14,8	10,5	6,7	3,2	23,9	17,0	11,2	7,7	C
0,471	0,551	0,653	0,836	6,5	4,7	3,1	1,6	10,1	6,7	4,7	2,6	13,9	10,5	6,8	4,3	19,7	16	12,7	7,2	C
0,465	0,551	0,660	0,836	7,7	4,8	3,1	1,8	11,5	7,6	4,2	2,7	16,8	11,8	8,0	5,2	23,1	16,6	11,3	6,4	C
0,471	0,564	0,674	0,843	5,6	3,5	2,0	1,1	9,2	5,9	3,3	2,1	14,8	11,3	7,4	4,1	24,6	19,0	11,9	7,7	C
0,465	0,551	0,660	0,856	5,7	3,3	2,4	1,2	8,3	5,3	3,7	1,9	13,8	9,6	7,2	4,0	22,4	15,5	11,2	6,5	C
0,460	0,545	0,667	0,822	5,0	3,4	2,1	1,1	7,9	5,2	3,6	1,8	11,7	8,0	4,9	3,3	19,4	14,0	9,1	5,8	C
0,437	0,514	0,600	0,737	6,1	4,1	2,6	1,5	10,0	7,3	4,7	2,8	15,6	12,5	9,5	5,7	25,5	19,1	14,4	9,3	C
0,437	0,514	0,606	0,765	7,9	6,0	3,6	2,1	9,9	7,5	4,6	2,7	20,3	14,5	10,2	5,9	27,9	22,6	16,9	10,8	C
0,426	0,533	0,629	0,770	9,7	6,5	4,0	2,2	12,0	8,6	5,2	3,1	22,6	15,9	12,1	7,4	28,4	23,2	19,0	14,6	C
0,409	0,520	0,620	0,800	11,0	6,8	4,1	2,7	15,9	9,0	6,6	4,3	25,4	17,7	10,8	7,6	32,5	24,5	17,0	13,4	C
0,412	0,523	0,630	0,804	10,3	6,5	4,4	2,1	16,5	11,3	6,0	3,7	26,6	20,8	12,9	6,5	33,7	27,2	17,1	11,1	C
0,415	0,524	0,630	0,804	10,4	6,1	4,0	2,1	14,6	9,4	6,0	3,9	23,9	16,3	10,2	5,3	32,7	22,9	16,3	9,6	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.12 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1968.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,417	0,523	0,634	0,800	8,5	5,6	3,0	1,5	12,9	7,0	4,7	2,1	18,5	12,0	7,5	3,7	33,2	25,8	19,2	9,9	A
0,415	0,526	0,630	0,804	13,2	7,9	4,5	2,2	16,1	10,0	5,9	3,4	22,6	17,1	12,5	8,3	36,4	28,1	21,5	12,4	A
0,414	0,516	0,626	0,796	10,1	6,3	3,6	2,1	14,2	8,9	5,7	2,8	23,1	16,6	9,8	5,6	35,0	27,6	18,4	14,9	A
0,418	0,526	0,633	0,800	12,5	8,4	5,1	2,5	15,9	11,1	7,0	4,5	24,6	18,4	12,7	6,2	32,5	23,4	16,3	11,3	A
0,423	0,526	0,633	0,800	7,7	4,4	2,6	1,2	8,7	5,4	3,1	1,8	13,0	7,4	4,4	2,8	24,3	17,0	10,7	7,3	A
0,397	0,501	0,619	0,764	12,2	7,1	4,5	2,4	16,6	8,9	6,6	3,6	22,2	14,9	9,9	5,7	32,0	25,6	18,4	10,6	A
0,398	0,494	0,586	0,758	9,2	5,0	3,0	1,9	12,2	6,8	5,1	2,7	19,1	12,7	8,6	4,8	29,5	23,4	17,7	10,5	A
0,409	0,504	0,596	0,768	6,0	3,4	2,5	1,3	8,7	5,7	3,9	1,9	16,1	10,0	7,7	3,8	25,2	19,4	14,3	8,7	A
0,415	0,489	0,593	0,758	8,8	6,5	3,7	1,7	12,8	9,2	6,3	3,7	19,6	15,6	8,4	5,4	30,2	24,3	18,1	9,7	A
0,426	0,507	0,600	0,765	9,8	7,5	4,2	2,3	12,6	10,5	6,7	3,2	21,6	17,1	10,8	5,8	31,4	26,7	20,1	13,5	A
0,440	0,517	0,610	0,765	4,9	3,4	2,1	0,9	7,7	5,7	3,8	1,9	15,6	9,1	6,5	3,8	27,7	20,5	12,9	7,6	A
0,431	0,517	0,620	0,782	7,7	4,5	2,8	2,1	10,1	6,5	4,2	2,9	19,5	13,1	8,1	6,0	29,8	24,0	17,8	12,2	A
0,417	0,523	0,627	0,800	16,8	10,1	5,3	2,8	18,1	14,0	8,0	3,9	28,3	22,3	17,0	9,0	35,4	28,6	21,6	13,4	B
0,415	0,523	0,627	0,808	13,1	9,5	6,4	2,6	17,7	11,9	7,7	4,0	25,6	20,3	13,1	8,0	34,9	27,2	22,0	13,9	B
0,420	0,520	0,626	0,800	14,5	9,2	5,8	2,8	18,1	12,7	8,4	4,5	28,1	21,9	15,4	9,1	39,2	28,0	22,1	15,6	B
0,420	0,523	0,630	0,804	13,9	9,2	5,8	2,6	16,5	12,9	7,7	4,8	28,4	21,3	15,6	8,4	34,7	27,2	21,9	14,8	B
0,420	0,520	0,626	0,800	12,2	8,2	5,1	2,6	14,5	9,8	6,3	3,3	24,0	17,8	13,0	7,2	33,2	27,2	21,2	12,8	B
0,420	0,507	0,606	0,779	13,1	8,7	4,4	2,5	17,7	13,4	7,6	4,4	23,7	19,9	11,9	7,3	32,6	28,2	19,6	13,7	B
0,403	0,501	0,593	0,764	11,4	6,8	4,0	1,8	16,5	11,2	7,1	3,0	25,5	19,8	14,2	6,8	34,5	28,2	23,4	14,6	B
0,403	0,501	0,593	0,765	12,1	8,5	4,6	2,3	18,7	13,1	7,7	4,3	29,8	23,7	16,7	9,8	37,1	29,9	24,5	16,2	B
0,406	0,492	0,590	0,761	14,4	9,1	6,3	2,7	17,9	13,5	9,8	4,9	28,3	23,8	17,7	10,4	37,2	29,9	23,2	15,2	B
0,415	0,495	0,586	0,758	12,9	8,0	5,3	2,5	16,8	12,9	8,2	4,1	25,4	21,3	16,6	8,6	36,6	29,5	25,5	16,5	B
0,415	0,495	0,593	0,758	15,5	12,0	7,4	3,8	18,5	12,3	8,6	4,6	25,0	20,9	17,0	8,8	32,8	27,0	21,9	13,7	B
0,420	0,501	0,603	0,765	11,4	11,1	6,5	3,2	19,9	14,3	8,9	5,4	26,6	20,8	15,9	10,4	33,4	26,8	21,3	16,2	B
0,410	0,516	0,630	0,812	13,6	9,1	4,3	3,2	17,2	12,2	6,3	4,8	27,2	18,2	13,9	8,6	30,8	21,7	17,4	11,1	C
0,415	0,523	0,633	0,807	11,0	7,7	4,1	2,1	16,2	9,8	6,0	2,7	25,2	17,7	12,5	6,5	33,9	26,2	18,0	12,1	C
0,420	0,523	0,630	0,804	10,2	6,3	4,4	2,2	13,6	9,0	5,8	3,1	21,3	16,5	11,6	6,6	27,3	21,1	17,3	10,3	C
0,417	0,523	0,630	0,804	9,8	6,7	4,8	2,4	13,0	8,6	6,8	3,5	22,8	17,1	10,9	7,6	32,5	26,1	20,6	11,3	C
0,420	0,520	0,626	0,800	9,2	7,6	4,7	2,3	15,0	10,1	7,2	3,6	22,8	16,3	12,6	6,6	31,0	23,4	18,9	12,6	C
0,426	0,507	0,592	0,764	10,8	7,5	5,3	2,6	13,4	9,6	7,0	3,5	23,9	17,9	13,7	7,7	31,1	25,8	19,8	11,9	C
0,404	0,495	0,586	0,765	10,2	5,8	3,5	1,8	15,2	9,1	5,9	2,8	23,4	16,5	12,3	6,2	35,1	27,4	18,9	11,7	C
0,409	0,495	0,593	0,758	9,8	7,2	4,4	2,8	14,1	9,9	7,0	3,6	24,3	16,9	13,8	6,8	33,6	26,0	20,2	13,2	C
0,403	0,489	0,586	0,758	11,5	8,0	5,1	2,2	15,9	13,6	8,6	4,4	26,4	21,3	14,4	6,7	33,9	29,8	19,3	11,4	C
0,414	0,491	0,592	0,757	11,8	8,4	5,5	2,8	13,8	11,3	7,2	3,2	23,2	19,1	10,6	7,1	32,2	27,3	18,4	11,0	C
0,417	0,498	0,600	0,761	7,9	5,8	3,8	2,1	11,2	8,6	4,3	2,7	22,1	17,3	11,0	6,6	31,3	24,3	18,0	12,3	C
0,419	0,505	0,607	0,780	14,8	11,1	6,9	3,8	23,1	20,2	14,9	7,1	28,1	21,5	18,3	10,8	32,6	28,7	21,7	13,7	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.13 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1969.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,420	0,514	0,613	0,744	12,2	8,3	5,1	3,1	15,5	10,0	6,8	4,0	20,8	16,3	10,1	6,2	30,7	24,7	19,5	12,9	A
0,429	0,523	0,617	0,765	11,2	7,3	4,4	2,5	14,5	9,4	7,1	4,4	21,9	16,5	10,1	6,3	30,0	23,0	18,1	11,8	A
0,426	0,523	0,627	0,765	9,8	5,4	3,1	2,0	11,5	6,9	4,5	2,4	18,0	12,9	7,5	4,9	28,8	23,3	16,8	11,6	A
0,426	0,526	0,627	0,758	8,0	5,9	3,3	2,1	12,3	8,0	5,2	3,3	18,8	13,3	9,0	5,6	29,1	21,6	15,7	9,8	A
0,409	0,539	0,647	0,751	8,2	4,6	2,9	1,6	12,8	7,2	4,5	2,7	18,8	12,5	7,9	5,2	30,8	23,8	15,6	11,0	A
0,437	0,529	0,640	0,772	9,4	6,6	4,0	2,4	14,3	9,4	6,0	3,9	20,0	13,0	9,1	6,2	30,6	21,4	14,6	10,5	A
0,431	0,532	0,640	0,761	5,8	3,5	2,1	1,5	8,4	5,6	3,8	2,7	15,6	9,9	7,1	5,3	30,3	22,3	16,7	11,8	A
0,431	0,538	0,646	0,764	7,7	4,4	2,7	2,0	11,9	7,0	4,6	3,4	16,9	10,6	7,1	5,1	28,4	17,2	12,2	9,2	A
0,432	0,526	0,640	0,765	11,5	8,9	4,7	2,8	15,0	11,2	5,5	4,1	22,0	16,8	10,6	6,8	34,1	25,6	16,5	12,3	A
0,426	0,526	0,633	0,758	12,0	7,7	4,8	3,4	17,1	12,0	7,6	4,5	23,9	18,0	11,2	7,3	36,4	26,5	17,7	11,9	A
0,426	0,526	0,627	0,758	10,7	7,7	3,8	2,5	15,6	10,9	6,9	5,4	22,3	16,4	11,0	8,5	31,4	25,4	19,5	13,4	A
0,432	0,533	0,633	0,758	6,2	4,4	2,5	2,0	9,6	6,7	4,4	3,6	17,1	11,7	8,7	6,3	31,1	23,7	16,7	13,2	A
0,415	0,495	0,579	0,751	16,8	12,4	7,5	3,9	20,9	15,8	11,1	5,6	27,2	23,3	17,7	9,9	34,5	28,8	22,9	15,1	B
0,426	0,520	0,613	0,758	14,4	8,8	5,8	3,0	20,0	13,9	9,4	5,1	28,3	20,7	16,0	9,8	33,9	27,7	22,8	16,5	B
0,426	0,523	0,630	0,765	12,9	7,3	5,2	3,1	17,6	12,3	8,5	5,6	24,2	19,3	14,4	9,7	31,3	25,9	20,5	14,9	B
0,432	0,526	0,633	0,765	11,1	7,5	5,3	3,0	16,7	12,0	7,5	5,1	24,4	20,3	12,9	9,7	32,9	24,8	19,3	14,1	B
0,415	0,545	0,654	0,758	14,5	9,4	4,6	2,7	20,4	14,1	8,4	4,5	28,4	19,1	13,4	8,4	35,9	25,6	19,9	14,2	B
0,452	0,526	0,633	0,756	12,8	7,8	4,3	2,6	19,1	11,6	7,6	4,6	28,6	20,3	14,2	10,0	36,9	29,0	22,1	16,4	B
0,431	0,539	0,647	0,764	11,7	7,0	5,0	2,3	16,7	11,0	7,9	4,1	23,8	18,3	12,9	7,4	32,8	26,4	21,1	14,9	B
0,431	0,538	0,646	0,758	13,7	9,3	6,0	3,4	18,4	12,9	9,0	5,5	25,0	18,4	12,9	9,2	31,1	25,7	18,9	14,5	B
0,432	0,526	0,633	0,765	12,2	7,6	5,1	2,9	15,7	10,6	7,5	4,6	23,3	18,3	14,7	9,6	31,8	26,3	22,6	15,4	B
0,432	0,533	0,640	0,765	14,3	7,9	5,1	3,0	19,4	12,0	7,9	5,0	27,8	18,1	14,4	9,2	37,3	24,6	20,2	14,1	B
0,420	0,520	0,633	0,729	12,9	9,0	4,9	3,7	17,8	12,3	7,3	4,8	24,7	19,7	13,5	10,0	35,0	24,3	19,3	15,4	B
0,432	0,539	0,633	0,754	13,1	8,4	5,5	3,1	17,4	11,7	8,1	4,3	25,6	19,3	13,5	9,1	31,1	26,5	19,3	14,5	B
0,420	0,501	0,593	0,751	12,1	8,9	5,5	2,9	16,1	12,2	8,2	4,0	23,3	17,4	13,1	7,6	30,5	24,6	18,3	11,7	C
0,426	0,507	0,606	0,765	9,1	6,4	4,8	2,6	14,6	8,9	6,6	4,2	22,8	17,1	13,1	7,7	27,3	23,0	18,0	11,4	C
0,426	0,520	0,627	0,758	8,7	5,6	3,7	2,3	12,9	8,6	6,0	3,5	19,6	14,9	10,0	6,4	26,5	21,2	14,8	10,7	C
0,429	0,526	0,630	0,761	6,2	3,7	2,7	1,8	11,4	6,5	4,9	2,8	17,7	11,9	9,1	5,8	25,2	16,9	14,4	9,7	C
0,409	0,539	0,647	0,751	9,9	5,4	3,4	2,0	12,9	7,8	5,2	3,4	24,0	17,0	10,9	7,7	30,6	24,8	16,3	11,5	C
0,434	0,526	0,637	0,768	7,7	5,0	2,9	2,1	12,7	7,6	5,1	3,0	19,8	13,1	8,8	5,9	28,6	18,3	13,4	9,3	C
0,431	0,538	0,646	0,764	5,9	3,5	2,3	1,5	10,2	6,2	4,1	2,8	18,6	12,7	8,2	5,7	27,8	19,6	13,4	9,9	C
0,431	0,533	0,640	0,761	7,0	4,0	2,2	1,5	11,1	7,4	4,4	2,9	18,2	11,9	7,7	5,1	22,8	16,1	11,2	7,7	C
0,432	0,526	0,633	0,765	9,2	5,6	3,6	2,3	13,3	9,9	6,1	4,0	21,7	15,4	10,3	7,4	29,6	23,1	16,7	12,5	C
0,432	0,533	0,640	0,765	9,9	5,9	3,9	2,6	14,8	10,5	6,1	3,7	21,7	15,4	12,0	7,3	27,6	20,5	16,0	9,1	C
0,420	0,520	0,620	0,751	11,2	8,3	5,3	3,8	14,0	10,9	7,6	5,2	22,6	16,9	12,3	8,6	28,4	24,5	19,6	15,0	C
0,426	0,526	0,640	0,751	10,1	6,2	3,4	2,1	16,3	10,3	6,3	4,7	23,2	17,2	11,9	7,8	32,9	25,7	16,6	12,7	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.14 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1970.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,420	0,520	0,640	0,772	9,2	6,6	4,9	2,8	12,9	8,8	6,4	3,3	18,9	14,1	10,7	6,7	28,6	23,1	17,6	11,9	A
0,415	0,533	0,627	0,751	10,6	6,7	4,6	2,6	14,1	8,6	5,9	3,5	22,1	13,5	10,1	5,8	32,1	23,3	18,1	11,7	A
0,429	0,523	0,633	0,751	9,2	5,8	4,5	3,0	12,0	8,1	6,0	4,1	17,8	12,9	9,5	6,7	24,1	18,6	14,4	10,3	A
0,409	0,517	0,633	0,786	9,3	5,5	3,6	2,4	11,7	7,2	4,7	2,8	20,9	13,3	8,7	6,2	29,9	19,8	13,7	9,1	A
0,418	0,521	0,645	0,753	11,2	6,7	4,5	3,2	14,1	8,8	6,2	4,1	18,8	13,2	9,2	6,5	29,1	23,0	17,0	12,4	A
0,496	0,492	0,631	0,753	11,1	6,8	4,1	2,6	13,3	8,2	5,1	3,3	16,6	13,2	7,8	6,5	28,3	21,2	14,1	11,2	A
0,407	0,486	0,604	0,739	10,3	6,7	3,7	2,9	14,1	9,6	5,4	4,4	19,8	13,3	8,2	6,3	31,4	24,0	17,1	13,5	A
0,422	0,506	0,618	0,743	8,2	5,5	4,9	2,5	10,5	8,2	6,8	3,6	16,5	12,1	10,3	6,2	31,0	21,3	17,6	11,6	A
0,422	0,487	0,597	0,736	7,2	5,4	3,3	2,2	9,9	7,2	4,9	2,8	17,9	11,0	7,7	5,5	29,0	22,4	16,7	11,4	A
0,417	0,473	0,586	0,723	7,2	5,1	3,2	2,2	9,8	6,4	4,3	2,9	15,5	11,4	7,3	5,0	25,1	18,9	13,0	9,3	A
0,405	0,480	0,593	0,731	8,5	6,1	4,2	2,4	10,9	7,7	5,1	3,4	18,8	13,1	7,7	5,7	29,2	23,3	16,0	9,9	A
0,417	0,499	0,631	0,753	7,4	4,8	3,0	2,3	10,0	6,4	4,4	3,5	15,2	10,6	7,0	5,0	28,5	22,4	15,9	12,2	A
0,454	0,533	0,630	0,758	11,4	8,2	6,3	3,8	16,0	12,1	8,6	6,2	24,1	17,8	14,4	10,8	33,2	27,4	22,3	17,0	B
0,396	0,508	0,606	0,737	17,9	12,2	7,3	4,9	21,6	14,2	9,8	6,3	26,0	20,8	15,7	10,7	32,8	27,6	20,2	15,1	B
0,432	0,517	0,627	0,747	16,8	12,3	8,3	5,5	19,0	15,1	10,8	7,6	23,1	19,5	15,1	9,8	31,8	25,9	18,4	13,2	B
0,415	0,508	0,627	0,783	16,2	11,9	6,8	4,6	19,8	15,0	9,2	6,4	26,1	19,6	14,3	9,5	33,8	27,3	19,9	14,5	B
0,396	0,498	0,611	0,732	17,1	11,5	7,1	4,7	21,1	13,6	9,4	6,8	26,3	21,2	15,6	12,5	32,6	27,4	20,6	16,7	B
0,407	0,498	0,618	0,746	16,2	10,6	7,2	4,4	20,0	14,5	10,4	6,6	27,1	20,3	15,6	11,1	33,9	28,7	22,8	16,9	B
0,390	0,492	0,591	0,717	18,5	11,7	6,2	3,9	22,1	13,3	8,6	6,1	28,3	20,7	13,6	9,9	35,9	26,9	18,5	14,5	B
0,416	0,493	0,590	0,728	16,9	14,2	9,6	4,7	21,8	17,8	13,1	6,4	27,9	24,1	18,6	11,6	32,9	28,0	22,7	16,2	B
0,399	0,474	0,576	0,721	16,0	12,2	7,7	4,9	19,0	15,4	9,6	6,6	26,3	21,4	15,5	10,2	32,3	24,8	18,1	14,6	B
0,388	0,467	0,573	0,709	17,0	11,1	7,3	4,2	22,2	16,4	10,6	7,3	29,2	21,9	16,9	10,2	36,0	28,8	23,5	16,4	B
0,394	0,448	0,586	0,716	19,1	14,7	9,2	5,7	22,6	18,4	11,7	7,2	28,0	23,3	17,1	11,2	35,4	31,5	20,7	15,8	B
0,405	0,467	0,593	0,727	16,0	13,1	7,9	5,5	20,5	16,0	11,0	7,4	24,3	20,6	14,8	10,1	38,0	27,9	19,7	14,9	B
0,428	0,520	0,633	0,775	7,6	5,5	3,6	2,8	13,9	8,4	6,0	4,3	19,2	13,4	9,9	7,0	27,8	20,7	15,4	12,6	C
0,404	0,501	0,613	0,754	12,4	8,3	5,0	3,2	17,5	11,4	7,8	4,7	23,9	17,9	12,0	8,3	33,1	24,9	18,3	13,3	C
0,420	0,520	0,627	0,783	9,5	6,7	4,1	2,6	15,3	10,1	6,3	5,4	16,8	14,0	8,5	6,3	24,9	20,6	13,6	9,7	C
0,415	0,508	0,640	0,772	11,8	7,5	4,4	3,1	15,4	10,1	5,9	4,0	16,8	10,9	7,6	4,6	30,0	20,7	14,9	9,8	C
0,412	0,489	0,611	0,739	11,3	7,9	4,6	3,3	13,8	9,7	6,3	4,6	19,0	13,9	9,0	6,8	26,9	22,0	15,0	10,9	C
0,396	0,486	0,611	0,750	10,6	5,9	3,5	2,3	14,4	8,2	5,0	3,9	19,9	13,6	9,1	6,3	31,5	22,0	15,0	9,5	C
0,401	0,492	0,611	0,739	12,5	7,7	4,5	2,7	15,7	11,1	6,5	3,9	22,0	16,4	9,7	5,4	31,3	24,6	15,7	10,3	C
0,399	0,480	0,597	0,721	12,8	7,6	5,2	3,4	15,5	9,7	7,2	5,2	21,7	15,0	11,2	8,3	28,5	22,0	17,2	12,9	C
0,422	0,487	0,597	0,736	11,7	7,8	5,4	2,9	15,2	10,6	7,0	4,2	21,0	15,7	11,1	7,5	25,3	20,6	15,4	9,7	C
0,405	0,467	0,580	0,716	14,1	9,8	7,3	4,1	16,2	11,1	8,8	4,9	23,2	17,6	13,4	8,2	28,4	24,0	18,6	12,7	C
0,400	0,460	0,580	0,716	12,7	9,3	5,9	3,7	16,0	11,5	7,1	5,1	22,1	18,7	11,2	8,2	28,8	23,6	16,5	13,7	C
0,417	0,492	0,614	0,745	16,8	11,8	8,3	4,8	19,4	13,1	10,0	5,7	23,8	17,3	13,1	7,6	29,4	23,2	18,7	12,1	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.15 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1971.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,432	0,520	0,642	0,784	7,2	4,7	2,9	1,9	9,3	6,4	4,1	2,6	14,5	10,4	6,3	3,9	24,9	19,7	13,2	9,4	A
0,418	0,500	0,625	0,776	9,6	5,5	3,1	1,9	12,1	7,2	4,6	3,0	18,8	11,8	6,8	4,7	27,9	19,7	12,9	8,1	A
0,409	0,493	0,600	0,746	9,9	7,2	4,2	2,3	12,3	8,1	5,1	3,0	17,6	11,0	7,7	4,4	29,5	23,2	15,7	9,5	A
0,415	0,506	0,607	0,769	8,3	6,2	3,7	2,0	9,6	7,1	4,2	2,5	17,1	10,7	6,6	4,1	26,3	21,3	12,4	7,9	A
0,424	0,502	0,625	0,746	7,4	4,9	2,9	1,8	9,9	6,4	3,9	2,3	16,1	10,4	7,3	5,0	27,4	20,7	14,3	8,3	A
0,420	0,497	0,620	0,741	8,8	6,3	3,4	2,3	12,4	9,4	5,2	3,6	19,0	15,9	9,5	6,4	28,8	24,6	17,2	11,6	A
0,382	0,467	0,606	0,736	9,7	5,6	3,4	2,0	12,9	7,3	5,3	2,5	20,8	13,6	9,0	4,8	29,7	25,5	16,8	11,1	A
0,401	0,493	0,625	0,736	13,3	6,3	3,7	2,7	18,1	8,7	5,7	3,7	26,2	15,0	9,4	6,9	38,3	27,0	18,9	15,2	A
0,376	0,459	0,580	0,707	10,2	7,1	3,8	2,6	12,8	9,5	5,1	3,5	22,9	16,7	8,1	5,8	32,7	25,0	18,2	11,2	A
0,400	0,491	0,596	0,737	10,3	6,3	3,8	2,2	14,1	8,8	5,7	4,2	20,7	15,7	8,7	5,7	37,1	27,5	19,2	12,3	A
0,392	0,494	0,572	0,707	9,7	6,2	4,1	2,4	11,7	7,8	5,4	3,1	17,2	11,8	8,0	5,2	28,7	21,1	16,9	9,9	A
0,380	0,459	0,580	0,722	11,0	7,0	4,2	2,4	14,6	9,9	6,6	4,3	22,7	15,3	9,9	6,4	31,8	27,2	19,8	13,0	A
0,418	0,493	0,614	0,761	16,9	12,8	8,0	5,5	20,5	16,6	11,1	7,8	25,0	21,3	16,5	11,7	31,5	27,7	21,3	15,5	B
0,415	0,493	0,621	0,769	15,3	11,9	8,2	4,6	19,0	15,0	10,1	6,5	23,4	19,5	14,8	9,9	28,4	24,0	20,2	13,2	B
0,397	0,480	0,621	0,776	16,6	11,0	6,7	4,9	20,5	14,0	10,2	7,9	24,3	19,5	13,4	10,7	30,1	25,0	18,7	14,2	B
0,409	0,487	0,614	0,761	17,2	13,0	7,2	4,2	20,5	16,0	9,4	6,4	26,0	23,1	14,4	10,0	32,2	25,9	20,4	13,8	B
0,405	0,476	0,602	0,736	18,6	10,4	7,2	4,2	21,4	13,5	9,9	5,9	27,8	20,3	16,1	10,1	35,8	26,4	21,2	15,4	B
0,401	0,472	0,602	0,736	14,4	10,3	5,7	3,3	18,0	13,7	8,9	5,6	25,6	20,6	14,4	8,8	35,6	28,1	21,1	14,5	B
0,401	0,480	0,602	0,736	12,9	8,9	5,5	2,9	18,0	12,8	8,6	4,8	27,4	20,3	15,8	9,9	34,7	28,4	22,8	14,7	B
0,401	0,480	0,618	0,736	14,1	11,4	6,6	4,9	17,1	14,7	8,1	6,5	26,2	20,8	15,1	10,0	31,4	26,8	19,6	15,2	B
0,372	0,446	0,561	0,707	18,7	12,6	7,8	5,2	22,6	15,6	10,2	6,9	30,0	24,5	16,9	13,1	36,0	31,1	23,2	17,7	B
0,388	0,476	0,582	0,727	14,4	8,6	5,8	4,7	17,3	12,6	8,7	6,3	25,5	17,5	13,9	10,3	33,3	21,7	17,0	13,5	B
0,384	0,476	0,584	0,717	16,4	11,1	7,2	4,9	19,4	13,2	8,7	5,3	26,2	20,0	14,0	9,4	33,0	26,6	19,0	14,1	B
0,380	0,463	0,556	0,707	17,5	13,3	8,1	3,9	24,2	17,4	12,2	6,5	31,4	24,9	13,3	12,0	36,9	30,9	25,7	17,6	B
0,415	0,500	0,642	0,776	16,3	11,3	6,5	3,9	19,5	13,8	8,0	5,2	23,8	17,9	11,7	7,8	29,3	23,0	17,1	12,1	C
0,418	0,503	0,621	0,772	11,0	8,0	5,2	2,6	13,3	10,0	6,6	4,0	17,7	14,5	9,4	5,7	23,8	19,7	12,6	8,2	C
0,391	0,473	0,614	0,761	12,7	8,5	4,7	2,9	15,3	10,5	6,1	4,2	19,5	14,7	8,6	6,2	27,0	20,6	14,6	9,4	C
0,415	0,493	0,614	0,761	8,1	5,6	4,1	2,1	11,2	7,1	5,6	3,1	17,6	11,8	8,6	4,6	23,1	17,8	14,1	8,0	C
0,401	0,476	0,597	0,736	12,5	9,5	5,5	3,4	17,6	11,4	7,7	4,6	23,6	16,0	11,4	7,7	32,2	23,9	17,5	11,2	C
0,398	0,472	0,592	0,731	16,0	11,0	6,3	3,8	20,6	15,0	8,1	5,1	24,4	18,7	11,9	7,7	30,4	25,3	17,0	11,8	C
0,405	0,476	0,592	0,726	16,3	12,2	6,9	4,1	20,9	14,6	4,5	5,6	25,3	19,5	12,9	8,6	30,5	24,3	19,0	13,1	C
0,396	0,480	0,618	0,743	14,5	10,7	5,8	3,5	17,7	12,8	7,3	4,4	24,7	17,3	11,6	6,7	27,4	21,2	15,2	9,3	C
0,372	0,437	0,570	0,707	15,9	10,3	6,1	3,1	18,6	12,3	7,0	3,8	24,0	18,1	11,0	6,9	31,4	24,3	17,1	11,5	C
0,369	0,465	0,580	0,712	14,2	8,5	5,1	3,2	17,9	10,8	6,9	4,4	22,3	14,2	9,6	6,2	28,5	21,2	14,2	9,3	C
0,380	0,480	0,589	0,732	16,7	11,1	6,9	4,0	20,7	13,3	8,9	5,3	23,9	18,0	12,6	7,4	29,3	23,2	18,0	12,4	C
0,369	0,450	0,570	0,712	17,3	11,6	6,8	4,1	20,5	13,9	9,1	6,7	23,5	18,0	11,4	7,0	30,7	25,1	18,4	11,8	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.16 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1972.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,386	0,463	0,570	0,686	11,7	8,1	5,1	3,2	15,0	11,2	6,9	4,6	22,1	17,6	11,7	7,7	31,0	24,2	20,2	13,9	A
0,369	0,476	0,569	0,698	9,6	6,0	4,0	2,6	13,1	8,1	5,3	3,6	21,8	13,7	8,8	6,0	29,3	23,5	16,7	10,6	A
0,381	0,452	0,576	0,723	14,4	9,1	4,8	3,1	16,3	10,3	6,3	4,4	21,5	15,5	8,9	6,9	32,5	24,6	11,2	12,0	A
0,384	0,487	0,599	0,708	11,5	7,4	4,1	2,6	15,0	9,9	6,6	4,0	22,2	14,5	9,8	6,4	33,9	26,9	19,0	12,7	A
0,358	0,473	0,599	0,742	15,0	8,3	5,5	3,1	19,4	11,6	6,9	4,5	26,7	17,3	10,9	6,7	36,1	27,1	21,1	12,9	A
0,373	0,457	0,569	0,708	11,2	7,4	4,2	2,6	14,3	10,0	6,4	3,9	23,0	17,5	11,5	8,2	32,8	28,8	20,0	12,9	A
0,365	0,457	0,571	0,693	15,7	9,5	5,8	3,4	19,0	12,3	8,1	5,0	25,0	18,1	12,1	7,4	29,6	22,6	17,2	12,4	A
0,358	0,476	0,585	0,723	12,1	8,2	4,9	3,2	13,8	9,4	6,4	4,5	21,0	15,6	10,1	6,6	34,8	29,1	19,3	11,9	A
0,411	0,503	0,625	0,790	12,3	7,8	4,0	2,6	16,9	11,3	5,7	3,7	26,1	17,2	9,7	6,7	33,0	27,6	17,6	11,6	A
0,429	0,520	0,634	0,809	11,9	7,4	4,9	2,6	15,5	10,3	6,4	3,4	22,6	14,2	8,4	4,7	29,5	22,3	16,8	10,4	A
0,403	0,499	0,625	0,780	10,4	6,4	3,5	2,2	12,6	8,2	5,0	3,1	18,7	12,6	7,5	4,7	30,8	22,4	15,1	9,9	A
0,396	0,478	0,598	0,752	13,4	8,9	5,6	3,3	15,8	11,5	7,2	3,9	26,5	19,4	12,8	6,6	35,4	29,1	22,3	13,1	A
0,386	0,467	0,565	0,686	18,7	13,2	8,8	6,7	22,6	16,2	10,3	8,2	26,4	20,7	16,1	12,1	30,6	27,6	20,0	16,9	B
0,368	0,470	0,571	0,708	22,6	14,4	10,5	5,7	25,7	15,1	12,1	6,9	29,8	21,2	16,1	11,3	35,3	28,0	21,4	16,0	B
0,381	0,470	0,568	0,698	17,4	12,6	7,9	4,3	19,9	14,9	10,0	6	26,9	22,4	16,7	10,5	31,9	26,4	20,7	13,7	B
0,365	0,448	0,585	0,698	19,3	14,2	8,3	5,7	22,0	17,2	10,8	7,3	29,1	24,0	17,7	11,8	34,9	29,7	23,6	17,6	B
0,373	0,452	0,562	0,698	16,0	12,7	7,7	5,2	21,2	17,1	10,6	7,1	27,4	23,9	17,1	12,0	32,2	27,2	21,3	15,4	B
0,365	0,444	0,544	0,688	19,9	15,4	10,1	5,4	23,3	18,4	12,8	7,5	29,0	24,1	18,3	11,5	32,9	29,9	23,0	15,5	B
0,373	0,461	0,557	0,683	14,7	11,9	7,1	4,7	18,3	15,0	9,0	6,0	26,1	22,6	14,8	10,2	30,9	27,4	21,6	14,7	B
0,369	0,459	0,585	0,713	21,1	14,9	9,6	4,7	29,2	22,7	13,7	8,1	31,8	24,7	16,9	10,2	36,0	27,0	20,2	12,2	B
0,400	0,483	0,603	0,752	18,2	12,5	8,7	4,3	22,3	16,3	10,9	5,7	28,7	22,3	15,8	9,4	33,4	26,6	20,8	13,0	B
0,411	0,520	0,625	0,780	16,5	10,0	6,3	3,3	20,0	11,8	7,7	4,3	24,8	17,5	12,3	7,1	32,1	23,3	18,1	11,2	B
0,411	0,491	0,616	0,766	18,3	13,1	8,0	4,7	20,8	15,5	10,4	6,6	27,7	20,4	14,7	9,5	36,9	27,5	19,9	14,7	B
0,407	0,499	0,600	0,771	17,8	12,9	7,5	4,6	22,3	17,3	10,3	6,5	26,8	21,2	14,9	10,3	32,4	26,7	19,8	14,9	B
0,361	0,437	0,561	0,707	15,9	12,3	7,9	4,8	18,4	15,1	10,0	6,1	23,6	18,2	12,9	8,6	27,3	21,7	16,2	10,9	C
0,381	0,470	0,571	0,707	14,0	9,8	5,7	4,0	15,7	12,4	7,7	4,8	21,9	15,6	11,1	7,4	28,3	22,0	16,4	10,5	C
0,373	0,482	0,590	0,732	17,5	10,3	6,9	4,4	21,2	12,8	8,4	5,2	24,9	17,7	11,9	8,2	30,4	23,6	18,5	12,0	C
0,350	0,448	0,569	0,683	16,7	11,6	7,4	4,2	19,7	13,7	9,0	6,4	24,3	18,8	12,9	8,8	30,2	22,6	16,2	12,4	C
0,369	0,444	0,580	0,708	13,4	10,3	6,2	4,0	18,1	13,7	7,8	5,3	24,3	19,2	14,8	9,0	30,5	25,5	18,5	14,0	C
0,350	0,448	0,562	0,693	17,2	11,0	6,8	4,4	21,2	13,7	9,0	5,6	27,0	19,1	13,9	8,7	29,4	22,9	16,3	12,0	C
0,380	0,470	0,562	0,708	10,6	8,2	6,3	3,8	17,8	12,6	8,0	4,7	24,4	19,0	12,3	7,7	25,6	23,6	18,0	11,8	C
0,354	0,427	0,362	0,698	20,4	13,7	7,7	4,2	23,9	18,1	10,7	6,1	29,8	23,6	15,5	8,9	38,2	32,3	22,4	14,7	C
0,399	0,487	0,616	0,748	12,1	8,3	4,9	3,1	15,2	9,9	6,2	5,4	21,3	14,8	9,3	6,5	28,8	21,9	14,1	9,5	C
0,392	0,503	0,612	0,785	14,6	9,0	5,3	2,8	18,3	10,6	6,8	3,8	24,8	14,9	10,1	6,2	34,5	24,5	16,9	9,8	C
0,407	0,487	0,612	0,752	15,5	9,2	5,5	3,4	18,1	11,3	7,1	4,3	22,2	16,1	10,4	6,3	28,2	20,5	15,3	9,0	C
0,396	0,480	0,598	0,752	13,1	9,2	5,3	3,2	16,3	11,8	7,2	4,0	22,7	16,4	10,6	7,0	30,0	22,4	15,2	10,1	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.17 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1973.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,395	0,475	0,596	0,739	10,5	6,4	3,8	2,4	12,9	8,2	5,3	3,1	18,9	12,7	7,9	5,2	31,0	24,0	17,1	9,9	A
0,422	0,526	0,650	0,796	12,3	7,0	3,9	2,3	14,8	9,3	5,4	3,1	20,9	13,7	8,7	5,1	34,0	24,9	17,3	10,6	A
0,395	0,490	0,594	0,715	12,8	7,8	5,4	3,2	16,4	10,5	6,8	4,3	21,0	16,7	10,4	6,6	33,7	27,6	19,2	12,9	A
0,421	0,504	0,632	0,772	10,9	7,2	4,0	2,9	13,9	9,5	5,5	3,5	18,2	14,1	8,1	4,9	32,0	24,6	15,0	9,6	A
0,426	0,517	0,628	0,729	13,3	8,3	6,0	4,3	15,3	11,1	7,7	6,1	23,4	17,4	12	9,3	31,3	23,5	19,6	15,3	A
0,399	0,479	0,605	0,763	10,8	7,9	4,4	2,5	14,8	10,4	5,9	3,1	22,5	16,7	9,6	4,8	34,4	28,9	18,2	10,0	A
0,407	0,496	0,628	0,772	8,0	5,1	2,6	1,7	10,2	7,3	3,6	2,5	18,0	13,3	7,0	4,6	27,5	22,8	13,1	8,2	A
0,385	0,473	0,587	0,745	12,2	6,7	4,3	2,2	15,4	9,4	5,6	2,8	21,2	13,8	8,8	4,6	32,4	25,6	18,1	10,8	A
0,404	0,486	0,615	0,740	9,3	6,6	3,9	2,3	13,4	9,5	5,3	3,9	19,3	13,9	7,3	4,9	31,4	24,8	15,4	11,0	A
0,416	0,522	0,640	0,740	8,7	5,5	3,1	2,0	11,5	7,2	3,9	2,7	16,6	10,7	6,8	4,3	28,8	23,2	16,2	10,6	A
0,385	0,474	0,599	0,772	12,0	7,1	4,0	2,0	15,0	10,2	5,9	3,1	25,6	18,1	12,1	5,9	32,2	25,7	22,3	12,5	A
0,420	0,491	0,599	0,738	12,9	9,6	5,5	3,5	16,9	11,9	7,7	4,5	23,7	18,2	11,1	6,2	33,3	29,4	22,1	13,8	A
0,397	0,488	0,607	0,732	18,9	11,8	8,4	5,8	20,4	14,8	11,1	8,0	25,1	17,7	14,9	9,8	31,8	23,7	20,6	14,7	B
0,426	0,521	0,632	0,753	22,0	15,1	10,3	7,2	24,5	17,9	12,3	8,9	30,9	24,0	16,8	12,5	38,5	28,3	21,8	16,4	B
0,414	0,505	0,632	0,763	21,7	14,1	8,1	4,2	24,7	18,2	9,4	5,7	30,4	23,5	14,0	8,8	39,2	29,7	21,0	14,1	B
0,403	0,481	0,605	0,739	19,4	13,7	8,7	4,7	23,2	17,4	10,7	7,2	30,1	23,4	15,5	10,4	33,6	29,9	21,2	15,1	B
0,373	0,484	0,603	0,715	18,1	13,7	9,0	5,3	22,9	17,8	12,4	7,4	29,5	23,5	17,2	12,4	37,0	32,5	23,9	15,7	B
0,403	0,484	0,609	0,763	17,1	12,9	6,7	3,9	22,5	16,6	9,4	5,6	29,2	23,2	16,3	8,5	34,0	30,8	20,5	14,8	B
0,399	0,484	0,587	0,741	17,0	11,6	7,7	4,2	21,8	16,6	10,0	5,3	32,1	24,8	16,4	9,2	37,4	30,7	20,8	14,5	B
0,404	0,487	0,616	0,748	17,0	11,5	7,7	4,1	20,3	15,8	10,2	6,1	28,7	22,9	18,6	11,0	33,3	29,8	23,4	16,5	B
0,397	0,476	0,577	0,720	11,5	13,2	9,3	5,8	21,6	16,9	12,3	8,6	26,3	22,5	18,2	12,7	33,9	30,3	24,8	19,2	B
0,442	0,544	0,601	0,756	17,4	12,8	9,4	5,7	19,6	15,8	12,1	7,3	26,1	20,9	17,1	11,4	34,7	27,1	22,8	17,0	B
0,412	0,476	0,595	0,725	17,8	13,7	8,2	5,5	20,5	15,7	10,4	7,5	25,6	22,3	15,8	11,4	33,2	29,7	23,7	17,8	B
0,416	0,496	0,606	0,747	20,8	15,2	11,3	6,8	24,4	18,7	13,8	8,2	28,3	22,5	18,1	13,0	32,6	28,0	20,5	15,0	B
0,393	0,504	0,600	0,750	14,0	9,0	5,4	3,1	16,4	11,5	8,7	4,2	20,9	15,1	10,7	6,8	27,3	19,3	16,1	11,5	C
0,414	0,496	0,623	0,758	14,9	10,8	6,8	5,1	19,0	13,5	8,3	6,9	23,7	17,6	12,0	10,3	31,3	23,7	16,1	14,4	C
0,395	0,526	0,632	0,753	13,4	9,2	5,8	3,9	17,4	12,0	8,4	5,4	24,1	17,0	11,1	7,7	32,4	23,9	16,5	12,6	C
0,365	0,483	0,616	0,748	14,9	10,4	6,6	4,3	18,0	12,3	7,8	4,6	23,8	18,7	11,9	7,8	31,2	25,0	17,3	11,2	C
0,388	0,492	0,603	0,732	14,9	9,4	5,4	4,0	19,0	11,2	7,6	5,6	23,9	16,1	11,4	8,9	32,1	23,4	16,6	13,4	C
0,399	0,492	0,619	0,763	15,3	10,2	6,0	3,8	18,7	11,8	7,8	4,9	25,0	17,4	12,1	7,7	31,1	26,4	18,1	12,6	C
0,399	0,479	0,610	0,753	16,7	10,3	6,7	3,5	18,6	13,1	8,3	4,4	24,4	18,8	13,2	6,2	33,3	26,0	20,5	11,5	C
0,379	0,456	0,582	0,740	17,0	11,7	6,6	3,3	21,2	14,7	9,2	6,1	26,4	21,2	13,7	9,7	36,4	30,3	26,0	23,0	C
0,401	0,473	0,601	0,740	16,7	11,6	6,5	3,9	18,8	13,7	7,5	4,7	25,2	18,3	11,3	7,9	29,3	24,7	18,4	12,1	C
0,404	0,487	0,582	0,720	15,6	11,4	8,2	4,2	19,6	13,7	9,6	5,9	22,3	18,7	13,6	8,9	31,2	26,9	22,0	15,0	C
0,389	0,475	0,533	0,645	14,1	9,3	7,2	4,1	17,3	11,0	9,1	5,4	22,0	16,5	14,2	8,6	29,8	23,5	19,9	12,9	C
0,435	0,470	0,579	0,699	15,2	11,1	7,9	5,4	16,9	12,6	9,3	6,1	22,3	18,4	14,0	9,9	28,9	23,2	19,2	14,4	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.18 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1974.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,408	0,500	0,599	0,733	13,5	9,3	5,4	3,6	15,3	11,2	7,6	5,7	22,3	17,0	11,7	8,6	30,8	24,1	18,8	14,8	A
0,412	0,496	0,604	0,713	11,9	9,0	6,1	4,0	14,8	10,0	7,5	5,6	19,7	14,6	11,0	8,8	27,7	23,9	19,0	16,6	A
0,405	0,493	0,601	0,740	10,8	8,1	4,8	3,0	14,2	10,5	7,0	4,0	21,5	15,7	10,2	5,9	31,3	26,4	19,2	12,9	A
0,401	0,480	0,583	0,726	9,0	5,6	3,5	2,0	12,5	8,2	4,4	2,9	18,2	11,8	6,9	4,4	32,3	22,3	15,4	9,6	A
0,398	0,497	0,601	0,745	9,7	5,8	3,5	2,4	14,1	9,1	5,0	3,5	18,8	13,6	8,6	5,1	28,9	20,4	15,8	9,7	A
0,409	0,480	0,592	0,736	8,2	5,8	3,5	2,6	10,1	8,2	4,7	3,3	14,0	11,5	6,6	4,9	26,9	23,2	14,7	10,6	A
0,432	0,497	0,625	0,755	11,6	7,0	3,9	2,7	14,5	9,2	6,0	4,1	21,5	13,9	9,3	6,8	34,9	25,8	17,0	12,7	A
0,401	0,488	0,611	0,711	6,9	4,1	2,6	1,8	9,6	5,4	3,6	2,5	15,3	8,7	5,4	3,7	30,7	21,5	14,6	10,2	A
0,440	0,531	0,661	0,785	7,3	5,1	2,5	2,2	9,0	6,1	3,0	2,5	13,8	9,9	4,8	4,0	26,1	21,0	10,6	8,8	A
0,417	0,514	0,648	0,745	10,0	7,5	3,8	2,4	14,3	9,9	5,4	3,4	22,7	17,2	9,9	7,2	32,0	27,0	18,2	13,4	A
0,417	0,501	0,601	0,755	11,4	7,8	4,7	2,5	14,3	10,3	7,3	4,4	21,2	17,3	11,8	7,8	27,7	22,2	16,6	12,9	A
0,404	0,482	0,595	0,727	9,7	6,7	4,3	2,8	12,4	8,4	5,6	4,0	21,3	15,0	9,7	6,1	31,4	24,1	19,3	13,8	A
0,416	0,487	0,599	0,743	20,7	15,2	10,9	7,6	22,5	17,3	13,2	8,7	27,0	22,7	16,8	12,6	35,4	28,3	21,2	15,3	B
0,412	0,513	0,627	0,757	18,4	13,3	10,1	7,6	12,5	16,1	12,1	9,5	25,5	20,1	15,2	12,0	31,2	25,5	19,6	15,4	B
0,409	0,514	0,611	0,739	19,4	12,0	8,8	5,7	22,2	14,8	10,6	7,3	23,4	20,2	13,6	9,7	36,2	25,9	19,2	13,6	B
0,432	0,488	0,634	0,750	17,2	13,8	8,5	4,7	19,9	16,5	10,1	7,4	27,8	22,1	14,6	9,9	32,7	29,3	19,5	14,0	B
0,417	0,514	0,652	0,804	16,4	9,7	5,0	3,6	19,0	12,1	7,1	4,6	23,4	16,0	10,5	7,7	26,2	20,1	13,4	9,6	B
0,405	0,491	0,620	0,785	14,8	9,5	5,6	3,4	20,8	14,2	8,2	4,9	24,3	19,7	13,0	7,7	32,5	25,5	16,5	10,9	B
0,443	0,501	0,620	0,799	14,1	9,0	5,9	3,1	17,3	12,3	8,1	4,5	23,5	16,1	11,1	7,3	26,9	22,0	15,3	10,6	B
0,432	0,516	0,615	0,736	13,8	8,0	4,8	3,2	17,3	11,9	7,9	5,0	23,9	17,9	12,2	8,2	29,0	24,7	19,0	12,4	B
0,428	0,524	0,615	0,745	14,5	9,2	6,5	4,7	17,8	14,0	10,0	6,9	22,6	17,9	13,8	10,0	30,3	25,6	19,2	15,5	B
0,413	0,497	0,611	0,745	13,7	10,0	5,6	2,9	18,4	13,7	8,3	4,4	26,5	19,9	13,1	8,0	33,0	26,8	19,4	13,7	B
0,415	0,515	0,626	0,782	18,7	10,9	7,1	3,6	22,7	14,7	9,6	5,7	26,5	18,5	14,0	9,0	35,3	25,6	19,6	12,7	B
0,404	0,503	0,626	0,782	17,8	10,2	5,2	2,9	22,6	14,7	8,4	4,5	29,9	22,0	14,6	8,9	37,1	29,9	21,0	13,6	B
0,408	0,483	0,599	0,718	13,6	10,7	7,1	3,9	17,1	13,2	8,9	5,5	23,2	16,5	13,1	8,3	31,5	25,3	20,5	13,9	C
0,411	0,521	0,677	0,752	13,7	8,9	5,6	3,6	16,7	10,8	7,1	5,2	20,5	14,5	9,8	7,1	25,6	20,4	14,0	10,5	C
0,390	0,497	0,634	0,770	13,2	7,8	4,5	2,6	15,9	9,6	5,5	3,7	20,2	12,9	7,8	5,7	26,8	19,7	12,5	8,6	C
0,379	0,471	0,576	0,709	12,1	9,4	5,0	3,3	15,0	11,6	5,8	4,4	19,0	15,7	10,8	7,1	27,3	24,4	16,2	12,1	C
0,409	0,488	0,606	0,726	12,7	9,7	5,4	3,6	14,8	11,1	7,2	4,6	19,9	15,6	10,3	7,1	26,4	20,8	16,0	11,0	C
0,413	0,506	0,625	0,721	10,3	5,8	3,9	2,7	13,1	7,3	5,4	4,2	18,2	10,9	8,1	6,5	22,9	19,2	12,8	10,2	C
0,401	0,482	0,588	0,701	10,7	5,7	3,6	2,0	13,8	8,4	5,5	3,4	21,7	13,7	9,2	6,0	29,8	23,2	16,1	11,3	C
0,401	0,493	0,585	0,731	11,0	7,4	4,4	2,7	13,2	8,7	5,7	3,7	18,6	12,8	9,6	6,0	25,7	20,5	14,8	9,2	C
0,396	0,461	0,615	0,775	12,5	8,7	3,7	2,6	15,8	10,9	5,1	3,7	20,0	13,8	7,9	5,6	29,2	23,0	13,2	10,3	C
0,409	0,476	0,588	0,716	10,0	7,0	4,4	2,6	12,6	8,2	5,6	3,2	18,4	13,9	9,0	5,6	26,6	21,9	15,2	9,3	C
0,409	0,506	0,611	0,736	11,9	6,9	4,4	3,0	13,7	7,7	5,8	4,9	20,5	13,8	9,4	8,0	31,7	25,5	18,8	13,1	C
0,404	0,490	0,606	0,734	12,9	8,8	4,5	3,1	14,2	10,3	6,1	4,5	21,7	15,9	9,2	7,0	27,9	20,6	15,2	10,9	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.19 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1975.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,418	0,527	0,633	0,741	13,6	7,7	5,7	3,8	16,0	10,7	6,6	5,4	25,0	15,1	10,6	8,1	32,1	25,4	18,8	13,8	A
0,413	0,503	0,617	0,764	11,9	7,7	4,8	3,2	14,7	9,5	6,2	4,2	21,4	13,6	9,7	5,9	31,5	23,8	18,8	11,4	A
0,413	0,495	0,622	0,749	11,0	7,3	4,1	3,0	14,7	9,8	5,9	4,0	19,0	14,4	8,4	5,7	30,0	23,2	15,3	11,0	A
0,417	0,520	0,649	0,785	11,3	6,5	3,3	2,2	14,3	8,0	4,1	3,3	23,2	13,2	7,8	5,2	30,1	22,1	14,1	9,9	A
0,413	0,520	0,667	0,818	14,0	9,6	5,2	3,3	17,7	12,6	6,8	3,9	23,2	18,4	10,8	6,2	31,8	26,1	18,1	10,8	A
0,413	0,512	0,703	0,823	7,0	6,2	3,3	2,3	8,7	7,9	5,1	2,8	14,9	13,4	7,6	5,0	30,1	23,7	16,9	9,6	A
0,402	0,474	0,622	0,766	8,6	5,1	2,6	1,8	11,8	7,7	3,9	2,6	19,3	14,2	7,2	4,9	30,9	25,5	16,3	10,5	A
0,376	0,447	0,514	0,599	10,2	8,0	4,7	2,7	14,2	10,8	6,8	4,0	22,4	16,8	11,0	6,3	31,3	25,4	19,2	11,8	A
0,406	0,495	0,609	0,780	12,4	7,7	4,9	2,7	16,1	11,0	6,2	3,6	23,4	15,9	10,1	5,5	35,9	27,9	19,5	12,0	A
0,410	0,495	0,627	0,761	12,6	7,9	4,8	2,6	16,0	10,3	6,6	3,7	25,1	17,5	9,9	5,4	35,1	28,5	20,6	11,4	A
0,430	0,510	0,600	0,751	11,3	7,7	4,6	2,8	14,0	9,7	5,9	3,4	22,2	15,0	9,9	5,7	28,4	23,7	17,4	11,3	A
0,402	0,470	0,595	0,713	13,8	10,2	5,8	3,1	16,5	11,8	7,0	3,8	25,4	19,2	11,5	5,6	30,8	27,3	20,9	12,9	A
0,398	0,488	0,595	0,717	17,8	11,9	7,7	5,6	22,3	15,4	11,1	8,8	29,1	20,7	15,4	13,3	34,0	27,4	21,8	19,4	B
0,418	0,505	0,617	0,745	18,6	12,9	7,5	5,3	20,1	15,5	9,9	6,8	24,1	19,3	13,9	9,4	30,2	26,1	17,8	12,7	B
0,400	0,493	0,618	0,785	18,1	13,2	7,9	5,1	19,7	14,8	8,8	6,5	23,3	18,8	12,8	8,4	27,7	21,2	15,2	11,6	B
0,425	0,512	0,649	0,808	17,5	13,2	7,4	4,0	19,9	14,3	8,7	5,3	27,0	22,1	15,0	7,9	30,3	24,9	18,1	12,1	B
0,417	0,516	0,649	0,799	12,8	9,4	5,3	2,7	18,3	12,5	7,2	5,0	23,8	19,5	12,1	7,2	30,7	25,4	18,0	12,6	B
0,428	0,550	0,622	0,780	16,5	13,3	8,1	4,5	22,1	17,3	10,1	5,8	29,1	21,6	14,8	9,0	34,3	30,8	22,1	14,6	B
0,402	0,493	0,618	0,751	16,6	11,2	6,8	5,0	18,5	12,8	8,2	6,9	24,6	18,2	12,8	10,7	32,8	26,4	20,4	16,8	B
0,406	0,495	0,586	0,761	15,6	11,4	6,9	4,1	19,4	15,9	9,3	5,9	25,1	18,7	13,4	9,3	33,4	27,8	21,4	14,5	B
0,402	0,480	0,604	0,751	19,4	12,8	8,5	4,2	22,6	16,9	11,0	6,0	29,4	23,1	15,3	9,0	36,8	31,2	22,1	13,7	B
0,421	0,495	0,609	0,761	17,2	13,9	9,6	5,7	22,1	15,5	11,8	7,5	26,6	21,2	15,0	10,8	33,4	26,7	21,2	15,5	B
0,413	0,486	0,608	0,751	16,4	12,6	7,3	4,5	20,0	15,6	9,1	6,3	25,7	21,6	15,2	9,3	31,4	26,9	18,6	13,2	B
0,410	0,478	0,577	0,728	19,8	14,4	11,0	6,6	22,8	18,3	13,9	8,1	27,1	21,7	16,3	11,0	30,9	25,1	19,9	14,5	B
0,400	0,490	0,608	0,704	10,7	7,4	4,6	3,6	12,9	9,3	5,1	3,6	18,5	14,1	8,7	6,9	24,2	19,7	15,2	10,8	C
0,404	0,468	0,586	0,727	12,4	8,9	5,4	3,4	14,2	11,4	6,7	3,7	17,8	15,0	10,1	5,9	26,6	19,5	15,1	9,1	C
0,393	0,474	0,624	0,747	13,6	9,4	5,1	3,6	17,3	11,5	6,5	4,5	22,2	16,2	8,9	6,6	28,8	22,3	15,3	10,8	C
0,383	0,491	0,631	0,767	13,8	8,2	4,4	2,9	16,2	9,9	5,4	3,5	19,5	13,3	7,9	5,0	27,8	21,2	13,0	8,7	C
0,413	0,514	0,658	0,770	7,7	4,8	2,6	1,9	9,4	6,0	3,0	2,5	16,3	11,0	6,2	4,4	25,8	18,1	11,4	8,6	C
0,402	0,503	0,638	0,794	9,0	5,6	3,9	2,5	11,9	7,7	5,2	3,2	19,4	13,3	9,1	5,9	27,6	23,2	16,6	11,7	C
0,382	0,466	0,582	0,761	9,6	6,1	3,8	2,4	13,1	8,6	5,2	2,9	19,3	14,9	10,0	5,8	26,6	20,5	15,2	9,2	C
0,404	0,468	0,586	0,728	9,4	6,5	3,9	2,1	12,5	9,5	5,5	3,0	19,1	15,4	8,6	5,5	25,4	20,7	15,2	9,6	C
0,402	0,474	0,591	0,747	9,0	6,7	3,8	2,4	12,9	9,5	5,5	3,5	18,8	15,1	9,9	6,1	26,2	21,0	15,2	11,3	C
0,397	0,478	0,586	0,713	11,0	6,9	4,9	2,8	14,3	9,5	6,7	3,9	19,0	15,5	11,6	7,9	26,2	21,7	18,5	11,1	C
0,394	0,474	0,586	0,720	11,3	8,1	4,9	3,2	14,0	9,9	6,5	4,3	19,0	14,9	10,9	6,9	27,7	23,2	16,7	11,9	C
0,406	0,462	0,600	0,732	11,3	8,1	5,4	3,3	14,2	10,5	7,3	4,2	18,7	14,9	10,5	6,7	24,9	20,6	16,2	10,4	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.20 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1976.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,417	0,503	0,618	0,732	15,9	10,7	6,9	3,6	17,5	12,9	7,9	5,4	26,2	19,4	12,8	8,1	32,9	27,3	19,3	13,6	A
0,432	0,524	0,640	0,818	9,3	5,8	2,9	1,9	11,5	7,2	4,0	2,6	16,2	10,5	5,3	3,5	28,1	20,0	12,0	8,3	A
0,413	0,495	0,631	0,761	7,8	4,8	2,6	1,7	8,6	6,2	3,3	2,3	14,2	9,7	5,5	3,5	27,0	21,8	13,8	8,4	A
0,436	0,519	0,632	0,768	8,7	6,2	3,6	2,4	10,1	7,6	4,3	2,9	17,2	12,6	6,7	5,1	22,4	23,1	14,2	10,6	A
0,388	0,458	0,586	0,675	11,8	7,9	5,2	3,6	16,5	11,2	6,9	4,8	25,7	17,4	11,1	7,3	30,1	25,5	21,2	14,3	A
0,396	0,456	0,567	0,705	10,0	6,8	3,8	2,3	13,0	9,7	5,9	3,7	21,1	15,3	10,2	6,3	37,4	29,3	19,8	12,2	A
0,394	0,467	0,567	0,688	14,3	10,4	6,5	3,8	18,2	13,3	8,4	5,0	28,5	21,5	14,9	8,5	36,0	29,1	22,0	13,1	A
0,423	0,506	0,577	0,755	11,3	8,2	5,2	3,1	15,8	11,5	7,7	3,9	22,0	17,0	12,6	5,6	30,2	24,7	20,0	11,3	A
0,394	0,454	0,567	0,699	9,3	7,2	3,3	2,3	12,9	9,6	4,9	3,2	17,8	13,7	7,7	6,2	30,6	22,1	15,2	10,8	A
0,388	0,462	0,560	0,689	13,9	9,5	5,8	3,3	16,3	12,5	7,7	3,9	21,8	16,5	10,8	6,1	29,1	23,8	18,2	11,7	A
0,396	0,451	0,561	0,681	13,5	11,3	7,1	4,7	15,6	12,5	7,7	5,8	19,5	14,6	11,4	8,9	34,8	24,4	18,2	14,5	A
0,373	0,444	0,384	0,720	14,6	10,7	5,6	3,7	17,3	12,2	8,2	4,3	25,3	18,5	12,9	7,1	30,1	26,0	18,2	14,8	A
0,443	0,524	0,600	0,751	19,7	16,1	11,1	6,9	23,5	19,6	14,4	9,1	26,9	23,2	18,1	13,2	33,5	28,9	23,6	17,0	B
0,428	0,503	0,613	0,789	18,7	13,8	8,7	4,4	20,4	16,2	11,5	7,0	27,2	21,9	16,6	10,6	32,7	26,1	20,1	13,0	B
0,421	0,529	0,694	0,778	10,5	6,6	3,7	2,4	13,6	8,9	5,0	3,2	22,3	18,2	10,7	6,9	28,6	24,3	19,5	13,5	B
0,413	0,482	0,575	0,775	16,1	10,9	7,4	3,8	20,4	14,8	10,4	6,1	25,5	19,8	14,9	9,5	34,1	28,1	22,7	13,8	B
0,388	0,450	0,528	0,663	18,1	13,3	8,1	5,0	22,9	17,5	11,1	7,5	32,5	26,2	18,3	12,1	36,7	31,5	23,5	16,4	B
0,403	0,480	0,563	0,707	16,6	11,4	8,1	5,0	20,4	14,9	11,5	6,8	25,0	20,0	15,6	9,7	31,9	28,0	21,6	14,3	B
0,388	0,445	0,537	0,642	20,5	14,7	9,9	4,7	24,6	18,4	12,9	7,7	31,4	25,5	18,8	11,0	38,4	32,5	26,3	17,0	B
0,398	0,475	0,635	0,717	18,4	12,9	8,3	5,7	21,2	15,7	9,8	7,0	29,0	21,5	15,9	11,0	33,5	27,6	21,3	15,3	B
0,403	0,458	0,567	0,712	18,8	14,6	11,1	7,1	23,8	17,6	12,9	8,1	27,0	21,4	16,1	11,1	31,2	27,5	22,0	15,7	B
0,388	0,449	0,544	0,702	16,3	12,6	8,4	5,6	20,3	15,0	12,0	7,0	26,6	20,8	15,4	9,2	31,2	26,3	22,4	13,6	B
0,411	0,475	0,586	0,687	15,2	11,9	9,7	5,4	17,2	13,7	11,1	6,4	22,2	17,6	13,9	9,5	33,1	28,2	20,2	15,3	B
0,386	0,489	0,609	0,681	18,5	14,6	8,6	5,7	22,0	17,4	10,8	7,5	27,7	23,8	15,4	10,7	34,0	28,5	21,2	16,0	B
0,402	0,474	0,586	0,694	12,1	8,0	5,6	4,3	14,3	10,8	7,2	5,1	19,2	15,5	10,0	7,7	26,6	21,8	16,0	11,5	C
0,395	0,472	0,568	0,751	12,3	9,5	6,3	3,4	15,6	12,0	7,7	4,5	22,4	19,2	12,9	7,8	31,9	25,9	19,6	11,6	C
0,376	0,489	0,586	0,742	10,6	6,6	4,1	2,4	13,6	8,5	5,8	3,1	18,7	14,5	8,9	5,1	26,0	20,5	15,0	8,4	C
0,406	0,466	0,582	0,761	10,3	7,5	4,6	2,9	14,1	10,1	6,4	4,1	19,6	15,0	9,3	6,7	29,4	24,2	15,2	10,6	C
0,388	0,458	0,575	0,705	10,5	7,6	4,2	2,7	13,0	10,3	5,8	3,6	21,1	17,3	9,9	6,4	29,8	24,0	15,2	10,8	C
0,381	0,436	0,525	0,695	16,0	12,0	7,7	4,5	19,4	14,3	8,9	5,8	26,0	21,4	13,6	9,0	33,3	29,8	24,6	14,6	C
0,371	0,431	0,544	0,665	18,0	12,2	7,5	4,6	22,3	15,6	9,6	6,2	29,2	23,6	17,0	10,4	40,2	32,8	27,5	18,2	C
0,375	0,443	0,532	0,670	9,4	7,7	5,4	3,1	12,2	9,7	7,4	4,5	21,7	16,5	12,7	7,6	26,7	23,1	21,0	14,8	C
0,388	0,449	0,560	0,690	10,5	6,6	4,4	2,6	13,8	9,7	6,8	3,7	22,2	15,5	12,0	7,3	31,9	23,7	21,1	13,2	C
0,384	0,454	0,501	0,654	12,1	9,2	5,3	3,9	14,8	11,5	7,3	4,8	20,4	16,8	11,5	8,3	20,9	23,8	19,3	13,7	C
0,382	0,441	0,560	0,685	13,0	10,3	6,6	4,1	18,2	13,8	8,4	5,0	23,9	17,6	12,3	8,4	36,2	31,1	21,3	15,7	C
0,377	0,444	0,567	0,694	10,6	7,6	3,9	2,6	12,9	10,1	5,1	3,3	20,0	16,7	8,7	6,6	27,1	23,6	14,7	12,0	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.21 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1977.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,387	0,481	0,582	0,722	10,5	7,1	4,2	2,8	13,6	9,2	5,3	4,1	19,7	15,6	8,9	7,2	30,8	23,6	16,6	12,9	A
0,362	0,475	0,602	0,742	12,0	9,3	4,6	2,9	15,5	11,2	6,5	3,9	18,9	15,7	10,0	5,9	24,0	20,0	13,8	9,7	A
0,402	0,479	0,588	0,733	13,0	8,2	5,1	3,7	15,3	11,4	6,8	4,2	21,9	17,0	10,4	6,5	31,4	24,6	18,5	11,8	A
0,428	0,496	0,630	0,730	15,9	11,1	7,1	4,9	18,7	13,8	8,0	6,2	22,6	17,6	11,1	8,5	33,2	25,4	19,1	14,1	A
0,431	0,535	0,693	0,877	16,2	11,4	6,0	3,1	10,1	13,2	6,8	3,7	22,9	18,1	9,8	5,8	33,2	25,0	16,2	9,8	A
0,405	0,497	0,615	0,736	12,2	7,0	4,2	2,7	14,4	8,7	5,8	3,6	19,4	13,4	9,6	6,3	27,9	23,8	15,9	10,1	A
0,405	0,497	0,606	0,736	14,6	9,0	6,2	3,4	16,6	11,1	7,6	4,6	22,0	16,8	10,9	7,2	31,5	24,9	19,7	13,0	A
0,388	0,470	0,595	0,700	12,5	7,4	5,0	3,2	16,0	10,1	7,0	4,7	22,6	16,5	11,8	7,6	31,9	25,0	17,6	12,9	A
0,397	0,482	0,595	0,682	17,4	12,0	7,5	4,7	19,9	13,3	8,6	5,8	24,1	17,0	10,7	7,6	29,8	23,3	17,1	12,1	A
0,409	0,489	0,597	0,737	13,6	9,0	5,7	3,2	16,6	10,9	7,2	4,3	26,3	16,6	12,3	7,7	35,7	25,8	20,0	12,8	A
0,410	0,486	0,609	0,744	14,6	11,3	6,3	4,9	17,0	13,7	6,6	4,3	24,9	19,0	10,7	7,0	32,6	27,9	18,0	12,3	A
0,411	0,528	0,585	0,744	9,5	6,7	4,3	3,0	13,6	8,6	5,6	4,1	21,3	16,4	9,3	6,9	26,3	21,6	15,7	12,2	A
0,402	0,492	0,579	0,708	15,3	11,7	7,3	4,6	18,1	14,5	10,3	6,6	23,6	18,9	14,4	9,5	27,4	23,8	18,1	13,2	B
0,402	0,475	0,579	0,698	14,4	9,5	6,4	3,6	17,1	12,5	8,0	5,3	23,4	16,0	12,8	8,2	28,8	22,1	16,8	12,7	B
0,400	0,475	0,603	0,742	12,1	8,5	4,9	3,1	15,4	11,1	7,4	4,0	22,9	17,3	11,8	6,9	36,5	27,8	22,1	14,9	B
0,422	0,487	0,579	0,733	15,8	12,9	9,2	5,4	19,6	16,0	11,0	7,4	24,0	20,4	15,1	10,2	31,5	26,5	22,5	15,9	B
0,424	0,519	0,627	0,795	18,5	12,0	8,4	4,1	20,8	15,8	11,0	5,5	27,5	23,8	16,3	8,9	37,0	30,9	25,2	15,0	B
0,414	0,548	0,661	0,785	16,3	12,4	7,8	4,5	20,0	17,1	10,4	5,9	23,5	19,2	14,4	9,3	30,5	27,3	21,1	14,0	B
0,399	0,476	0,606	0,751	15,2	13,0	7,4	4,4	17,9	14,9	10,9	5,8	25,8	21,9	15,9	10,1	36,2	33,0	26,0	15,9	B
0,390	0,465	0,563	0,688	14,1	10,8	7,4	4,7	18,2	14,7	10,7	6,6	26,1	23,0	17,8	11,2	32,3	28,5	23,0	15,5	B
0,408	0,496	0,602	0,688	18,2	12,6	8,0	5,2	22,5	15,4	10,6	7,1	26,9	20,9	15,9	10,0	33,1	24,6	20,3	15,9	B
0,419	0,486	0,594	0,784	18,0	13,4	9,3	5,4	21,4	16,5	12,2	7,4	27,2	21,7	18,0	12,2	33,8	28,7	24,4	17,1	B
0,393	0,486	0,580	0,723	16,8	10,5	7,9	4,4	19,0	11,4	9,7	6,2	25,4	19,3	14,9	9,1	34,6	26,1	21,4	15,1	B
0,440	0,501	0,590	0,723	14,6	9,5	7,0	4,1	17,1	12,8	9,0	6,0	24,8	20,5	13,6	10,3	29,6	21,2	17,7	13,5	B
0,409	0,483	0,597	0,733	13,5	9,4	6,4	3,6	15,6	10,5	7,6	4,7	21,0	13,8	10,3	6,4	21,6	20,9	16,8	12,1	C
0,381	0,456	0,558	0,694	8,1	5,9	3,7	2,6	9,6	7,1	4,7	3,2	17,4	12,5	8,6	5,5	25,3	20,7	14,2	10,9	C
0,395	0,465	0,592	0,720	6,2	4,6	2,8	2,2	7,9	6,0	3,3	2,6	14,4	11,0	6,7	5,0	23,1	19,3	13,7	9,6	C
0,422	0,493	0,598	0,717	14,4	10,8	7,2	4,8	16,5	12,8	8,6	5,9	21,2	16,6	11,0	7,7	30,3	23,3	18,2	12,4	C
0,447	0,523	0,642	0,785	7,8	6,6	5,2	2,9	9,8	7,5	6,5	4,1	14,9	12,3	9,9	6,2	29,6	22,2	16,0	12,1	C
0,385	0,471	0,570	0,678	15,0	11,1	7,7	4,6	18,0	12,6	8,8	5,8	24,5	19,6	14,9	9,6	31,6	25,3	19,7	17,5	C
0,391	0,483	0,600	0,733	13,4	8,6	5,5	3,6	16,6	11,1	7,7	4,4	22,2	16,8	11,1	7,6	31,2	26,7	19,5	13,5	C
0,393	0,486	0,572	0,721	13,4	8,7	6,1	3,6	16,2	11,1	7,9	5,0	23,7	17,1	12,9	8,4	30,1	24,2	21,4	14,5	C
0,389	0,470	0,585	0,702	11,8	8,3	6,0	3,7	14,3	10,0	7,8	5,4	19,2	15,7	12,2	8,3	28,7	22,2	18,5	13,9	C
0,417	0,484	0,550	0,716	10,7	7,8	6,1	4,2	12,8	9,6	7,6	5,5	22,3	16,7	13,3	10,7	28,1	24,4	21,2	14,1	C
0,400	0,470	0,575	0,682	13,8	10,6	7,0	5,5	16,5	13,3	9,3	7,6	24,3	19,1	13,5	11,0	27,3	22,9	19,5	15,4	C
0,416	0,489	0,587	0,716	14,0	10,4	7,0	4,2	16,7	13,3	8,6	6,0	23,2	20,5	13,3	9,6	28,6	23,8	17,9	13,0	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.22 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1978.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,418	0,501	0,598	0,708	12,9	9,9	6,3	3,9	15,8	11,1	8,3	5,0	21,0	17,8	12,5	8,2	32,2	24,7	20,6	15,4	A
0,397	0,479	0,571	0,675	14,9	8,9	5,8	3,4	18,8	10,9	7,6	4,7	23,0	16,5	12,3	7,3	32,6	24,9	18,9	14,2	A
0,389	0,479	0,604	0,718	12,3	8,0	4,5	2,9	16,0	12,1	7,3	4,8	23,8	18,1	10,9	7,5	33,0	25,7	17,6	13,2	A
0,398	0,484	0,600	0,728	11,4	7,5	4,6	2,4	15,8	11,8	7,2	4,2	24,0	18,1	12,2	7,6	33,9	29,1	19,6	11,1	A
0,400	0,471	0,591	0,746	11,2	7,4	3,7	2,6	15,5	10,0	6,0	3,9	24,9	17,3	11,6	7,3	35,4	30,4	21,8	14,0	A
0,404	0,491	0,582	0,733	9,7	5,7	4,0	2,1	15,1	9,0	6,4	3,2	23,5	17,1	13,1	5,8	31,9	25,2	19,0	10,5	A
0,401	0,472	0,597	0,719	14,3	9,1	4,6	3,2	18,5	12,9	6,9	5,0	24,7	18,7	11,3	8,7	33,2	25,6	17,5	13,5	A
0,408	0,470	0,603	0,719	12,1	6,4	4,1	3,0	18,1	9,6	6,1	4,3	28,9	16,5	11,8	8,6	35,3	28,4	22,1	16,1	A
0,389	0,466	0,589	0,724	17,7	12,1	7,5	4,4	20,9	15,0	9,3	5,4	28,0	23,2	14,3	8,8	36,1	30,2	22,5	14,6	A
0,401	0,468	0,599	0,750	11,8	7,7	4,2	2,7	15,6	10,7	6,8	4,2	25,4	20,4	12,4	8,3	36,5	30,0	23,1	15,0	A
0,420	0,490	0,608	0,744	11,7	8,8	5,4	3,4	16,6	11,8	7,8	4,6	23,0	18,8	13,1	7,6	30,4	25,5	20,7	12,9	A
0,403	0,477	0,570	0,709	9,9	6,7	4,2	2,5	13,9	9,2	6,7	3,9	21,0	14,9	12,2	7,9	31,7	27,6	20,4	15,5	A
0,421	0,504	0,612	0,728	16,7	13,0	8,1	5,3	18,6	14,2	9,1	6,1	23,2	19,4	14,2	9,7	29,3	24,6	20,9	15,0	B
0,407	0,492	0,605	0,722	13,0	9,5	6,0	3,9	16,1	11,8	7,6	5,6	21,8	16,2	11,4	7,7	29,2	24,0	18,1	13,8	B
0,402	0,492	0,609	0,737	17,9	11,6	7,7	4,7	22,4	16,9	10,9	7,0	26,1	20,4	15,7	10,5	34,5	27,4	21,5	15,3	B
0,411	0,496	0,618	0,741	17,4	12,0	7,7	5,0	21,3	15,0	10,0	6,5	25,5	21,3	15,5	10,5	37,5	30,4	24,7	17,0	B
0,411	0,501	0,650	0,727	18,8	13,1	9,0	5,0	21,6	15,1	11,2	7,1	26,5	20,7	15,8	10,3	34,0	27,9	23,1	16,5	B
0,396	0,484	0,603	0,738	14,1	10,0	5,7	3,5	16,4	11,6	6,5	4,2	26,1	19,1	13,0	8,3	31,9	28,2	19,4	12,9	B
0,401	0,489	0,604	0,720	16,4	11,2	6,3	4,2	20,1	13,4	8,8	5,8	28,4	19,7	12,8	9,3	33,8	27,6	19,1	15,4	B
0,412	0,477	0,585	0,726	14,9	11,0	6,3	3,9	19,4	15,1	8,8	5,3	26,8	22,8	14,6	9,3	33,0	29,2	24,2	18,5	B
0,408	0,473	0,575	0,699	12,9	9,0	5,9	3,7	19,3	13,4	9,3	6,5	26,3	20,2	14,6	11,2	33,6	29,0	20,6	17,4	B
0,397	0,473	0,570	0,699	14,6	10,2	6,7	4,0	19,1	12,9	9,2	6,3	25,6	20,5	14,2	10,3	31,6	24,7	19,3	13,5	B
0,412	0,481	0,596	0,709	15,3	10,6	6,7	4,8	18,7	13,8	8,6	6,8	23,6	18,7	11,9	9,9	30,0	26,2	19,1	16,1	B
0,407	0,516	0,588	0,719	11,3	7,7	5,9	4,1	12,9	9,0	7,2	4,8	19,6	14,3	11,3	8,5	27,4	22,9	18,5	13,2	C
0,406	0,488	0,591	0,708	16,6	11,3	7,3	5,0	18,7	13,3	9,9	6,1	21,2	18,6	13,4	9,8	29,8	25,2	19,8	16,1	C
0,419	0,484	0,605	0,708	12,0	9,2	5,7	3,7	15,6	13,8	9,0	6,3	24,5	21,3	15,4	10,4	29,8	25,6	19,9	14,8	C
0,411	0,480	0,603	0,722	11,7	8,6	6,1	3,8	14,3	12,6	8,4	6,0	21,0	17,2	13,9	9,8	31,1	26,1	20,9	15,6	C
0,404	0,467	0,582	0,737	13,5	9,8	7,3	3,9	17,1	13,2	9,4	5,7	22,4	16,3	13,5	8,8	33,0	27,5	22,4	15,5	C
0,408	0,476	0,582	0,742	11,3	7,9	4,4	2,8	15,8	12,0	7,0	4,3	23,1	20,0	11,7	7,7	31,2	25,6	19,0	13,8	C
0,404	0,469	0,566	0,700	14,3	10,7	7,8	4,4	18,3	14,4	11,1	6,8	23,2	20,2	14,5	9,9	33,3	28,4	22,6	15,7	C
0,408	0,464	0,594	0,729	13,2	10,6	6,0	3,7	16,9	13,8	9,1	5,2	23,0	19,2	13,1	7,7	31,4	25,5	20,2	13,4	C
0,389	0,454	0,551	0,743	13,9	9,7	5,9	3,9	16,4	11,9	8,5	5,6	22,9	19,2	13,8	9,5	28,2	24,1	18,3	14,0	C
0,389	0,461	0,570	0,719	12,2	9,5	6,0	3,6	14,8	11,7	7,3	4,7	21,5	18,3	11,6	8,0	30,2	25,4	20,5	13,7	C
0,408	0,477	0,574	0,709	13,1	8,2	4,7	3,6	16,3	11,0	6,9	5,2	21,5	16,2	10,8	7,9	29,5	26,2	16,1	13,7	C
0,404	0,468	0,555	0,653	13,5	10,6	7,5	5,2	17,3	13,6	9,4	6,5	24,4	20,7	15,4	10,8	32,1	27,5	22,4	17,9	C

Fonte: Tango (1983).

Tabela B.23 – Resultados de resistência à compressão de concretos produzidos com cimentos das marcas A, B e C durante o ano de 1979.

Relação w/c				f_{c2} [MPa]				f_{c3} [MPa]				f_{c7} [MPa]				f_{c28} [MPa]				Marca
Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:7	Traço 1:8	
0,416	0,482	0,594	0,709	14,7	9,5	5,0	3,0	20,1	12,9	7,9	4,5	28,1	18,2	12,2	6,9	38,4	29,9	23,3	16,8	A
0,428	0,497	0,613	0,750	13,9	12,9	8,2	4,8	17,3	14,6	10,0	5,6	27,2	23,0	15,2	8,0	30,3	25,6	21,0	12,6	A
0,416	0,490	0,584	0,727	15,1	11,4	7,5	4,7	18,2	15,7	10,2	6,7	24,4	21,8	14,7	9,8	36,0	29,6	23,5	16,7	A
0,404	0,468	0,580	0,727	12,9	8,5	6,6	4,3	17,2	11,8	10,0	5,5	24,4	18,0	15,5	8,3	30,4	23,3	21,2	13,5	A
0,413	0,495	0,610	0,748	16,1	12,0	6,8	3,7	19,5	14,6	8,6	5,1	25,7	20,4	12,8	7,8	36,6	30,5	22,3	15,7	A
0,402	0,490	0,605	0,748	16,1	10,7	6,4	3,5	18,8	13,7	8,8	5,7	27,7	20,3	13,5	9,2	37,5	31,0	22,8	14,0	A
0,391	0,494	0,616	0,776	8,0	5,9	3,2	1,9	11,2	8,4	4,7	2,9	21,8	17,8	11,2	6,8	40,7	29,3	19,9	13,5	A
0,398	0,499	0,618	0,791	10,1	6,7	3,6	2,6	15,7	9,8	6,1	4,3	25,3	17,6	11,9	7,4	38,0	28,5	22,0	14,4	A
0,421	0,512	0,632	0,776	12,9	7,7	4,3	2,7	17,0	11,3	6,7	3,9	27,6	18,2	12,1	8,4	38,6	30,2	21,8	15,6	A
0,413	0,512	0,632	0,781	15,0	9,3	5,8	3,4	21,4	12,5	7,4	5,2	29,9	18,1	12,1	8,5	36,7	27,1	19,0	13,9	A
0,436	0,504	0,632	0,795	15,7	9,8	4,8	3,2	21,6	14,6	8,0	5,3	28,7	22,5	13,7	8,4	38,1	33,1	24,5	14,8	A
0,418	0,490	0,570	0,714	14,0	9,5	7,4	4,5	17,1	11,9	9,2	5,7	23,4	17,7	14,0	9,1	36,0	28,3	23,2	15,8	B
0,424	0,490	0,618	0,760	18,1	14,7	9,9	5,2	21,8	19,0	14,3	6,7	30,8	25,4	20,1	10,5	34,3	31,4	25,7	18,2	B
0,420	0,490	0,587	0,720	17,5	12,3	8,6	5,3	23,0	16,7	12,2	8,0	29,6	24,9	18,4	11,7	37,4	32,1	27,0	20,0	B
0,428	0,492	0,589	0,709	15,7	11,2	9,2	5,1	20,6	15,6	12,9	7,5	26,7	22,2	18,1	11,5	35,1	31,1	23,9	18,8	B
0,413	0,497	0,618	0,762	17,6	12,4	7,3	4,1	21,6	15,4	9,2	5,9	26,7	21,8	13,1	8,4	33,0	25,5	17,7	12,3	B
0,413	0,495	0,612	0,796	17,1	12,1	6,9	3,2	20,0	14,8	9,3	4,7	27,5	22,4	14,3	8,0	35,3	30,3	21,4	13,7	B
0,403	0,488	0,632	0,776	17,7	12,0	7,3	4,3	21,1	15,1	8,6	5,5	29,0	24,5	14,9	9,4	35,7	29,5	22,0	15,5	B
0,413	0,491	0,600	0,762	15,3	10,8	7,1	3,5	19,2	14,5	9,0	4,5	29,6	21,8	16,1	8,0	37,4	30,1	24,0	13,8	B
0,427	0,518	0,648	0,791	11,5	6,9	3,8	2,2	16,7	10,8	6,4	3,8	25,5	17,7	11,6	7,5	39,0	29,3	24,1	17,2	B
0,432	0,518	0,641	0,810	17,9	12,0	8,3	4,6	22,3	14,8	10,3	7,1	29,6	21,3	14,3	9,6	35,6	27,2	21,6	14,3	B
0,428	0,518	0,641	0,741	15,0	11,0	5,6	3,7	19,6	15,2	8,7	5,6	28,9	23,3	16,1	11,2	36,3	32,8	24,0	19,7	B
0,426	0,512	0,632	0,776	16,4	10,4	6,5	3,6	18,5	12,2	7,7	4,6	25,9	20,0	12,8	8,0	32,1	25,4	18,1	11,8	B
0,381	0,438	0,601	0,725	15,5	13,7	9,9	5,2	19,3	17,2	13,4	7,3	28,1	23,0	19,5	11	35,7	30,1	26,4	18,5	C
0,404	0,478	0,580	0,707	21,8	15,9	11,4	6,7	25,1	18,8	13,6	8,5	28,6	23,3	17,7	13,7	36,4	32,6	25,3	19,0	C
0,389	0,461	0,550	0,685	16,7	13,7	9,7	7,5	20,4	16,9	12,5	10,6	24,9	20,4	16,1	14,0	32,4	28,9	23,7	21,6	C
0,408	0,477	0,589	0,704	21,2	18,0	10,8	8,1	24,9	20,4	13,3	10,2	29,0	24,3	16,9	13,5	35,5	30,9	23,9	18,9	C
0,407	0,479	0,600	0,738	20,7	16,5	11,1	6,5	13,6	17,8	12,9	7,6	28,6	22,8	16,6	10,4	36,3	28,7	25,8	15,9	C
0,406	0,478	0,587	0,724	17,7	12,2	7,7	5,0	19,6	14,3	9,2	5,9	24,6	20,0	12,4	8,8	32,6	26,7	20,2	14,5	C
0,402	0,504	0,632	0,777	17,1	10,8	6,3	3,9	19,2	12,4	7,6	4,8	26,1	19,4	13,6	8,9	31,8	25,9	18,4	13,7	C
0,402	0,491	0,603	0,748	20,8	13,9	9,6	4,8	22,0	14,8	10,6	5,8	26,5	18,6	14,6	8,4	32,8	25,7	20,3	13,0	C

Fonte: Tango (1983).

Anexo C

Estudo de Helene (1987).

Informações e dados de resistência à compressão.

Helene (1987)^a apresentou em sua tese de doutorado, denominada “*Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para dosagem e controle dos concretos de cimento Portland*” um relevante estudo que envolveu, entre outros assuntos, a análise das curvas de crescimento da resistência à compressão do concreto em função do tempo.

O estudo em questão contemplou 6 diferentes tipos de cimento, oriundos das 56 diferentes fábricas existentes em território nacional na época, configurando amostras representativas de todos os cimentos nacionais.

Com essas amostras de cimento foram moldados 2.360 corpos de prova de argamassa com dimensões de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, para ruptura aos 3, 7, 28 e 91 dias, sendo 2 corpos de prova irmãos ensaiados por idade, totalizando 1.180 exemplares.

Todas as argamassas foram preparadas com areia normal brasileira, especificada na norma ABNT NBR 7214:1982 “*Areia normal para ensaio de cimento*”, com traço em massa de 1 parte de cimento para 3 partes de areia. Os 6 cimentos utilizados foram, conforme tipo e classe de resistência, os seguintes: CP 32, POZ 32, AF 32, CP 25, POZ 25 e AF 25. Além disso utilizou-se no estudo relações água/cimento (w/c) de 0,38; 0,48; 0,58; 0,68 e 0,78. Os corpos de prova, foram mantidos em câmara úmida com umidade relativa acima de 98 % e temperatura de $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$. Os ensaios de ruptura foram realizados em um período de 1 ano e 2 meses, conforme chegada das amostras de cimento e premissas da norma ABNT NBR 7215:1982 “*Ensaio de cimento Portland*”.

As Tabelas C.1 a C.6 apresentam os dados de resistência utilizados no estudo conforme o tipo de cimento analisado.

^a HELENE, Paulo Roberto do Lago. Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para dosagem e controle dos concretos de cimento Portland. 1987. 278 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

Tabela C.1 – continua – Resultados de resistência à compressão de argamassas produzidas com cimentos nacionais CP 32.

Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]				Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]				Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]			
			3 dias	7 dias	28 dias	91 dias				3 dias	7 dias	28 dias	91 dias				3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
1	101	0,38	13,7	20,3	31,8	38,8	36	108	0,38	20,3	24,8	33,4	40,9	71	115	0,38	22,2	29,7	37,0	42,8
2		0,48	10,3	20,1	31,4	37,8	37		0,48	20,2	24,4	32,9	40,4	72		0,48	21,5	29,5	36,8	42,5
3		0,58	7,5	18,3	31,1	35,8	38		0,58	13,0	17,0	24,9	34,8	73		0,58	12,8	19,5	29,7	37,0
4		0,68	5,1	14,1	25,8	30,8	39		0,68	9,3	12,8	20,8	29,8	74		0,68	14,1	15,4	25,3	33,3
5		0,78	3,4	9,6	18,2	21,2	40		0,78	7,0	9,9	25,4	23,5	75		0,78	10,1	13,7	21,8	26,7
6	102	0,38	19,6	25,0	34,1	40,0	41	109	0,38	15,0	21,2	33,0	44,8	76	116	0,38	23,9	28,4	34,8	36,3
7		0,48	19,5	24,7	33,9	39,6	42		0,48	12,2	19,1	32,4	44,5	77		0,48	20,6	25,9	33,1	38,1
8		0,58	17,8	23,5	31,8	38,1	43		0,58	9,3	14,5	27,4	38,9	78		0,58	13,8	19,8	25,2	29,5
9		0,68	11,6	16,7	23,8	30,7	44		0,68	6,3	11,0	21,1	30,1	79		0,68	10,5	15,3	21,1	25,5
10		0,78	8,2	11,1	18,3	26,3	45		0,78	4,2	7,4	14,8	23,1	80		0,78	8,2	11,4	17,1	21,2
11	103	0,38	18,1	22,6	34,2	39,8	46	110	0,38	19,1	27,2	39,3	51,1	81	117	0,38	25,1	31,1	41,5	44,1
12		0,48	16,3	22,4	34,1	39,4	47		0,48	18,0	25,8	38,9	50,1	82		0,48	23,1	30,5	41,4	43,8
13		0,58	13,5	20,0	33,8	36,3	48		0,58	12,4	18,8	31,1	41,7	83		0,58	18,1	24,1	34,3	36,5
14		0,68	8,2	14,6	25,4	30,2	49		0,68	8,1	14,8	23,5	33,7	84		0,68	11,8	18,8	22,8	30,8
15		0,78	6,7	10,6	19,7	26,5	50		0,78	5,4	10,0	16,1	24,3	85		0,78	9,0	13,8	22,3	27,2
16	104	0,38	17,3	24,7	33,9	39,1	51	111	0,38	15,4	21,0	32,8	38,1	86	118	0,38	16,9	24,8	37,5	46,0
17		0,48	16,5	22,3	33,6	38,8	52		0,48	14,4	20,9	32,3	37,5	87		0,48	16,9	24,3	37,1	45,7
18		0,58	14,8	20,7	33,3	37,8	53		0,58	9,8	16,3	24,6	31,6	88		0,58	11,0	16,9	26,6	33,6
19		0,68	9,9	14,2	25,2	30,6	54		0,68	6,2	11,3	18,5	24,8	89		0,68	7,6	13,1	21,2	29,2
20		0,78	6,5	9,7	19,5	26,6	55		0,78	4,9	8,7	14,8	20,3	90		0,78	6,0	9,2	15,6	20,2
21	105	0,38	15,0	25,0	34,7	44,5	56	112	0,38	18,8	21,8	31,6	40,1	91	119	0,38	18,7	27,5	39,4	47,9
22		0,48	13,9	22,1	32,5	43,7	57		0,48	16,7	21,2	31,4	39,6	92		0,48	17,2	27,2	38,8	47,6
23		0,58	8,9	19,5	30,4	38,2	58		0,58	13,4	17,8	27,3	36,6	93		0,58	13,9	23,7	35,5	41,2
24		0,68	7,1	15,0	24,6	30,2	59		0,68	9,5	12,2	21,3	29,9	94		0,68	9,8	15,8	25,4	32,8
25		0,78	4,6	11,3	18,0	26,3	60		0,78	7,3	10,2	18,2	24,6	95		0,78	6,9	12,5	21,2	25,6
26	106	0,38	23,7	29,8	36,1	43,1	61	113	0,38	17,8	24,3	39,6	45,1	96	120	0,38	24,9	29,2	39,0	44,9
27		0,48	22,0	27,0	32,6	43,0	62		0,48	15,3	23,8	38,7	44,8	97		0,48	24,4	29,0	38,7	44,5
28		0,58	15,1	22,0	27,8	33,3	63		0,58	10,3	16,9	30,1	41,0	98		0,58	15,3	22,3	30,7	33,0
29		0,68	11,5	17,2	23,2	29,5	64		0,68	7,2	12,7	25,7	34,0	99		0,68	11,7	14,6	25,3	32,0
30		0,78	9,9	15,1	20,9	26,8	65		0,78	5,8	9,4	18,6	27,5	100		0,78	8,8	11,3	20,1	23,3
31	107	0,38	18,1	24,9	34,0	41,0	66	114	0,38	17,3	24,8	32,5	50,2	101	121	0,38	20,8	24,0	30,9	33,0
32		0,48	18,3	22,8	33,9	40,6	67		0,48	14,3	21,5	32,3	49,6	102		0,48	20,2	23,7	30,7	32,6
33		0,58	13,5	18,4	27,6	36,4	68		0,58	10,1	16,3	25,8	40,2	103		0,58	14,0	19,6	24,7	30,6
34		0,68	9,3	14,1	21,6	30,4	69		0,68	7,1	12,3	19,2	30,5	104		0,68	10,0	13,4	20,7	22,5
35		0,78	6,9	9,8	16,2	22,5	70		0,78	5,4	9,8	14,3	23,5	105		0,78	8,5	12,0	18,1	20,7

Fonte: Helene (1987).

Tabela C.1 – continuação – Resultados de resistência à compressão de argamassas produzidas com cimentos nacionais CP 32.

Tabela 01 - Continuação - Resultados da Resistência à Compressão de Argamassas produzidas com cimentos nacionais CP-52.																							
Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]				Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]				Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]						
			3 dias	7 dias	28 dias	91 dias				3 dias	7 dias	28 dias	91 dias				3 dias	7 dias	28 dias	91 dias			
106	122	0,38	15,5	24,8	33,4	40,3	141	129	0,38	16,7	23,4	35,9	40,2	142	129	0,38	16,7	23,4	35,9	40,2			
107		0,48	15,1	24,5	32,9	39,8	142		0,48	11,5	18,1	30,1	38,7			143	0,48	11,5	18,1	30,1	38,7		
108		0,58	12,4	18,1	27,5	34,8	143		0,58	8,8	14,8	24,8	34,3			144	0,58	8,8	14,8	24,8	34,3		
109		0,68	6,6	13,7	20,9	25,9	144		0,68	6,2	13,2	22,6	27,5			145	0,68	6,2	13,2	22,6	27,5		
110		0,78	5,2	9,8	16,4	23,6	145		0,78	4,0	7,8	13,6	21,3										
111	123	0,38	18,5	23,5	33,8	41,8	146	130	0,38	20,2	27,6	36,9	44,5	147	130	0,38	20,2	27,6	36,9	44,5			
112		0,48	17,4	22,9	33,5	41,4	147		0,48	16,2	24,6	36,2	44,2			148	0,48	16,2	24,6	36,2	44,2		
113		0,58	11,5	16,1	26,0	33,0	148		0,58	12,5	18,7	31,4	36,7			149	0,58	12,5	18,7	31,4	36,7		
114		0,68	7,7	10,5	17,6	25,2	149		0,68	7,9	12,9	25,0	32,6			150	0,68	7,9	12,9	25,0	32,6		
115		0,78	5,8	9,3	16,4	23,4	150		0,78	6,3	11,0	20,8	28,2										
116	124	0,38	15,6	20,4	31,2	43,8	125	125	0,38	19,0	23,7	30,9	33,8	126	126	0,38	19,7	24,6	32,0	41,6			
117		0,48	13,8	20,2	31,0	43,6			126	0,48	15,2	21,4	30,1			33,6	127	0,48	15,2	21,4	30,1	33,6	
118		0,58	12,0	17,3	27,4	36,0			127	0,58	11,6	17,5	28,1			31,2	128	0,58	11,6	17,5	28,1	31,2	
119		0,68	8,7	12,2	24,1	32,6			128	0,68	9,6	15,4	25,7			28,5	129	0,68	9,6	15,4	25,7	28,5	
120		0,78	8,3	11,5	20,7	31,2			129	0,78	6,5	11,8	21,0			26,6	130	0,78	6,5	11,8	21,0	26,6	
121	125	0,38	19,0	23,7	30,9	33,8	126	126	0,38	19,7	24,6	32,0	41,6	127	127	0,38	14,6	20,8	30,4	40,3			
122		0,48	15,2	21,4	30,1	33,6			130	0,48	15,2	21,4	30,1			33,6	128	0,48	12,3	19,6	30,2	38,1	
123		0,58	11,6	17,5	28,1	31,2			131	0,58	11,6	17,5	28,1			31,2	129	0,58	7,8	12,8	21,4	31,6	
124		0,68	9,6	15,4	25,7	28,5			132	0,68	9,6	15,4	25,7			28,5	130	0,68	4,4	9,6	18,2	26,7	
125		0,78	6,5	11,8	21,0	26,6			133	0,78	3,0	7,4	15,5			21,1	131	0,78	3,0	7,4	15,5	21,1	
126	126	0,38	19,7	24,6	32,0	41,6	127	127	0,38	14,6	20,8	30,4	40,3	128	128	0,38	21,7	24,2	33,0	39,7			
127		0,48	15,9	23,9	31,8	41,5			134	0,48	12,3	19,6	30,2			38,1	132	0,48	20,9	23,7	32,6	39,2	
128		0,58	12,6	19,3	31,3	33,4			135	0,58	7,8	12,8	21,4			31,6	133	0,58	14,8	21,7	28,7	35,6	
129		0,68	11,2	18,8	25,7	31,4			136	0,68	4,4	9,6	18,2			26,7	134	0,68	11,3	15,6	23,1	29,4	
130		0,78	7,3	12,0	20,7	26,1			137	0,78	3,0	7,4	15,5			21,1	135	0,78	7,5	11,4	17,7	25,4	
131	127	0,38	14,6	20,8	30,4	40,3	128	128	0,38	21,7	24,2	33,0	39,7	129	129	0,38	21,7	24,2	33,0	39,7			
132		0,48	12,3	19,6	30,2	38,1			138	0,48	20,9	23,7	32,6			39,2	139	0,48	20,9	23,7	32,6	39,2	
133		0,58	7,8	12,8	21,4	31,6			139	0,58	14,8	21,7	28,7			35,6	140	0,58	14,8	21,7	28,7	35,6	
134		0,68	4,4	9,6	18,2	26,7			140	0,68	11,3	15,6	23,1			29,4							
135		0,78	3,0	7,4	15,5	21,1																	
136	128	0,38	21,7	24,2	33,0	39,7	129	129	0,38	21,7	24,2	33,0	39,7	130	130	0,38	21,7	24,2	33,0	39,7			
137		0,48	20,9	23,7	32,6	39,2			141	0,48	20,9	23,7	32,6			39,2	142	0,48	20,9	23,7	32,6	39,2	
138		0,58	14,8	21,7	28,7	35,6			143	0,58	14,8	21,7	28,7			35,6	144	0,58	14,8	21,7	28,7	35,6	
139		0,68	11,3	15,6	23,1	29,4			145	0,68	11,3	15,6	23,1			29,4							
140		0,78	7,5	11,4	17,7	25,4																	

Fonte: Helene (1987).

Tabela C.2 – Resultados de resistência à compressão de argamassas produzidas com cimentos nacionais AF 32.

Resistência à Compressão [MPa]																				
Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]				Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]				Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]			
			3 dias	7 dias	28 dias	91 dias				3 dias	7 dias	28 dias	91 dias				3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
1	101	0,38	17,3	27,5	38,9	48,5	36	108	0,38	21,6	30,7	42,2	49,1							
2		0,48	17,0	27,4	38,7	47,8	37		0,48	21,4	30,3	41,8	48,3							
3		0,58	12,2	20,7	32,8	41,2	38		0,58	13,4	20,5	31,6	40,1							
4		0,68	8,9	17,5	24,8	33,9	39		0,68	10,6	18,2	29,0	35,1							
5		0,78	6,3	10,3	19,2	25,1	40		0,78	6,5	12,6	20,4	27,1							
6	102	0,38	14,7	23,1	39,9	51,6	41	109	0,38	13,3	18,5	33,0	47,0							
7		0,48	14,1	22,0	39,8	51,4	42		0,48	11,9	18,2	32,1	46,6							
8		0,58	8,7	16,3	30,9	42,8	43		0,58	8,1	13,9	27,8	38,8							
9		0,68	6,7	11,6	24,9	35,6	44		0,68	5,7	10,5	21,1	31,5							
10		0,78	4,2	8,7	18,9	29,7	45		0,78	3,7	8,0	16,1	24,2							
11	103	0,38	10,6	17,3	34,4	49,3														
12		0,48	9,8	17,2	34,1	49,1														
13		0,58	6,3	12,1	27,3	39,6														
14		0,68	4,3	9,1	20,0	31,6														
15		0,78	3,2	6,6	15,3	25,7														
16	104	0,38	11,8	20,3	37,8	52,7														
17		0,48	11,6	20,2	37,5	52,5														
18		0,58	8,0	16,9	33,5	50,6														
19		0,68	5,6	12,1	27,1	40,2														
20		0,78	4,4	9,4	24,8	32,5														
21	105	0,38	17,5	26,3	45,9	54,6														
22		0,48	15,9	25,9	45,5	54,0														
23		0,58	10,0	16,8	33,8	43,8														
24		0,68	7,7	13,5	28,0	36,5														
25		0,78	5,2	10,3	21,6	32,7														
26	106	0,38	20,6	30,3	48,7	54,8														
27		0,48	19,8	30,2	48,3	54,5														
28		0,58	11,8	20,8	37,5	48,1														
29		0,68	8,9	15,9	29,7	37,5														
30		0,78	6,0	11,1	22,9	31,2														
31	107	0,38	18,4	27,4	49,5	51,3														
32		0,48	12,9	20,7	43,6	49,0														
33		0,58	7,6	13,1	29,8	41,2														
34		0,68	4,8	10,5	23,9	37,8														
35		0,78	3,0	8,3	21,2	30,9														

Fonte: Helene (1987).

Tabela C.3 – Resultados de resistência à compressão de argamassas produzidas com cimentos nacionais POZ 32.

Tabela 016 - Resultados de Resistência à Compressão de algarissas produzidas com cimento nacional - 02-02																				
Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]				Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]				Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]			
			3 dias	7 dias	28 dias	91 dias				3 dias	7 dias	28 dias	91 dias				3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
1	101	0,38	13,9	18,8	29,5	42,8														
2		0,48	13,6	18,4	29,2	42,5														
3		0,58	8,1	12,6	21,6	34,3														
4		0,68	5,7	8,9	17,5	27,6														
5		0,78	3,4	6,4	11,6	23,8														
6	102	0,38	21,1	26,9	36,0	48,4														
7		0,48	21,0	26,6	35,6	47,9														
8		0,58	15,1	19,1	25,1	34,7														
9		0,68	9,5	13,4	18,8	30,7														
10		0,78	6,0	10,2	15,1	22,5														
11	103	0,38	17,8	21,0	29,8	41,3														
12		0,48	17,3	20,7	29,4	40,5														
13		0,58	12,0	16,2	23,4	35,9														
14		0,68	8,1	11,9	20,3	30,0														
15		0,78	5,8	8,5	15,1	23,0														
16	104	0,38	20,6	27,2	33,2	42,3														
17		0,48	14,5	21,4	28,5	36,3														
18		0,58	10,4	17,7	27,8	35,1														
19		0,68	8,0	12,9	22,5	27,8														
20		0,78	5,4	9,5	17,0	25,4														

Fonte: Helene (1987).

Tabela C.4 – Resultados de resistência à compressão de argamassas produzidas com cimentos nacionais CP 25.

Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]				Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]				Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]			
			3 dias	7 dias	28 dias	91 dias				3 dias	7 dias	28 dias	91 dias				3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
1	101	0,38	9,6	16,8	25,9	30,1	36	108	0,38	18,1	22,6	29,7	37,1							
2		0,48	6,3	13,6	24,5	29,9	37		0,48	16,1	21,6	29,0	36,5							
3		0,58	4,2	9,7	19,5	25,2	38		0,58	13,5	18,6	27,5	22,0							
4		0,68	3,0	7,3	14,7	19,9	39		0,68	10,2	13,8	20,4	29,0							
5		0,78	2,2	5,0	10,8	16,7	40		0,78	7,2	11,2	16,8	23,3							
6	102	0,38	9,6	13,4	21,8	27,8	41	109	0,38	21,1	23,8	29,1	34,1							
7		0,48	8,8	13,2	21,4	27,3	42		0,48	20,7	23,6	28,8	33,5							
8		0,58	7,0	11,6	19,8	27,0	43		0,58	16,1	19,1	25,1	30,1							
9		0,68	4,8	8,5	17,2	24,8	44		0,68	11,6	15,3	22,4	25,7							
10		0,78	4,3	7,8	14,2	26,6	45		0,78	8,6	12,2	17,5	21,7							
11	103	0,38	17,1	20,7	29,0	37,4	46	110	0,38	16,2	19,3	26,4	36,0							
12		0,48	16,6	20,6	28,8	37,2	47		0,48	14,8	19,0	26,0	35,2							
13		0,58	12,0	17,0	23,7	29,1	48		0,58	10,8	14,1	22,0	31,0							
14		0,68	8,4	12,7	20,5	26,0	49		0,68	7,4	9,7	16,2	27,8							
15		0,78	6,6	10,8	16,4	23,5	50		0,78	7,0	8,7	15,4	25,8							
16	104	0,38	17,4	20,8	28,4	34,7	51	111	0,38	9,5	15,0	25,8	41,3							
17		0,48	16,8	19,4	27,9	33,6	52		0,48	8,3	14,4	25,3	41,0							
18		0,58	12,3	17,7	22,3	28,0	53		0,58	5,7	11,4	22,8	31,6							
19		0,68	7,4	11,8	17,4	21,4	54		0,68	3,9	8,0	18,7	27,5							
20		0,78	5,7	9,8	13,9	18,9	55		0,78	2,3	5,4	12,0	20,0							
21	105	0,38	13,6	19,3	25,8	33,0	56	112	0,38	14,9	20,4	27,0	36,3							
22		0,48	10,6	18,3	25,6	32,8	57		0,48	12,6	18,9	26,3	34,9							
23		0,58	7,8	14,1	21,7	29,4	58		0,58	9,2	14,3	23,3	31,8							
24		0,68	5,3	10,2	17,5	22,3	59		0,68	6,2	11,8	20,0	26,8							
25		0,78	3,8	8,0	13,1	18,2	60		0,78	4,1	8,2	17,6	20,8							
26	106	0,38	18,6	21,1	29,1	35,1														
27		0,48	18,0	20,7	28,4	34,7														
28		0,58	11,5	16,2	23,7	31,1														
29		0,68	10,4	14,9	21,3	28,2														
30		0,78	6,7	9,3	14,9	20,7														
31	107	0,38	20,9	25,7	32,2	42,7														
32		0,48	18,5	22,4	26,8	35,8														
33		0,58	13,6	17,6	24,1	33,4														
34		0,68	9,6	13,1	18,9	26,4														
35		0,78	7,0	10,4	15,3	21,4														

Fonte: Helene (1987).

Tabela C.5 – Resultados de resistência à compressão de argamassas produzidas com cimentos nacionais AF 25.

Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]				Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]				Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]			
			3 dias	7 dias	28 dias	91 dias				3 dias	7 dias	28 dias	91 dias				3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
1	101	0,38	9,9	22,4	29,4	36,3														
2		0,48	9,0	15,9	27,3	35,0														
3		0,58	6,9	12,4	24,6	34,0														
4		0,68	5,0	7,9	18,9	25,6														
5		0,78	3,3	6,0	13,8	19,4														

Fonte: Helene (1987).

Tabela C.6 – Resultados de resistência à compressão de argamassas produzidas com cimentos nacionais POZ 25.

Tabela 010 - Resultados da Resistência à Compressão de argamassas produzidas com cimentos nacionais - CE 20.																				
Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]				Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]				Linha	Ordem	w/c	Resistência à Compressão [MPa]			
			3 dias	7 dias	28 dias	91 dias				3 dias	7 dias	28 dias	91 dias				3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
1	101	0,38	10,9	13,9	19,7	33,9														
2		0,48	8,9	11,9	19,3	33,5														
3		0,58	6,4	9,2	15,6	29,5														
4		0,68	3,9	6,4	11,2	21,2														
5		0,78	2,9	5,2	8,3	15,5														
6	102	0,38	12,5	15,5	23,3	28,6														
7		0,48	6,6	11,1	21,1	28,0														
8		0,58	4,5	7,4	14,9	21,9														
9		0,68	3,6	6,1	12,3	18,2														
10		0,78	2,3	3,9	8,9	13,8														
11	103	0,38	10,5	14,3	25,8	32,8														
12		0,48	7,4	11,5	25,5	32,2														
13		0,58	4,8	8,5	19,3	25,4														
14		0,68	2,9	5,6	14,1	19,9														
15		0,78	2,1	4,7	10,8	16,7														

Fonte: Helene (1987).

Anexo D

Estudo de Battagin, Battagin e Munhóz (2010).

Informações e dados de resistência à compressão.

Em outubro de 2010, no 52º Congresso Brasileiro do Concreto do IBRACON, realizado na cidade de Fortaleza - CE, Battagin, Battagin e Munhóz (2010)^a apresentaram resultados de resistência média à compressão de 580 amostras dos principais tipos de cimentos produzidos no país, são eles: CP II-E-32, CP II-F-32, CP II-E-40, CP II-Z-32, CP III-32, CP III-40, CP IV-32, CP V-ARI e CPV-ARI RS, fabricados por todas as unidades brasileiras em diferentes regiões do Brasil.

As amostras de cimento foram ensaiadas à compressão entre os anos de 2009 e 2010 em diferentes idades (24 horas, 3 dias, 7 dias, 28 dias, 63 dias e 91 dias), no âmbito do Programa de Selo de Qualidade da ABCP.

Os ensaios foram realizados de acordo com a ABNT NBR 7215:1996 “Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão” vigente na época. As amostras foram preparadas com argamassa de cimento e areia normal padronizada (com frações grossa, média grossa, média fina e fina de 468 gramas cada), relação água/cimento de 0,48 ($w/c = 0,48$) e moldadas em corpos de prova cilíndricos (dimensões: 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura), conforme exigências da referida norma. Os resultados médios obtidos estão apresentados na Tabela D.1.

Tabela D.1 – Resultados de resistência média à compressão dos cimentos brasileiros, em função da idade.

Tipo de cimento	Resistência à compressão, em MPa, em função da idade					
	24 horas	3 dias	7 dias	28 dias	63 dias	91 dias
CP II-E-32	9,4	22,1	30,5	41,2	44,4	48,9
CP II-F-32	12,7	26,9	32,4	39,7	42,1	44,0
CP II-E-40	-	28,9	37,3	47,2	51,4	56,6
CP II-Z-32	12,7	24,9	30,5	38,2	40,1	42,6
CP III-32	6,5	16,3	27,2	41,8	48,4	51,4
CP III-40	10,5	21,4	33,4	48,2	51,3	56,0
CP IV-32	9,6	21,5	28,6	39,9	43,6	46,3
CP V-ARI	24,5	37,4	42,7	48,5	48,8	52,5
CP V-ARI RS	19,0	33,1	40,2	47,2	49,9	52,4

Fonte: Battagin, Battagin e Munhóz (2010), p. 13.

^a BATTAGIN, Arnaldo Forti; BATTAGIN, Inês Laranjeira da Silva; MUNHÓZ, Flávio André da Cunha. A evolução da normalização e de algumas propriedades dos cimentos Portland brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52., 2010, Fortaleza. Anais do 52 CBC2018. Fortaleza: Ibracon, 2010. p. 1-16.

Anexo E

Obra A (2013 - 2016).

Informações e dados de resistência à compressão do concreto.

Esta obra foi executada na cidade de São Paulo entre fevereiro de 2013 e maio de 2016, ou seja, em um período de 40 meses. No total foram analisadas 1.166 amostras de acordo com as diferentes famílias de traços de concreto. Cada amostra é composta por 3 exemplares ensaiados aos 7, 28 e 63 dias de idade.

Registra-se que parte destes dados já foram objeto de análise prévia do autor desta dissertação, conforme apresentado em artigo publicado no 62º Congresso Brasileiro do Concreto do IBRACON por Boni, Couto e Helene (2020).

Os resultados analisados foram obtidos por meio de ensaios de ruptura de corpos de prova cilíndricos (100 x 200 mm), realizados de acordo com a norma ABNT NBR 5739:2007 “*Concreto: Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*”, por laboratório acreditado pela RBLE do INMETRO e por profissionais capacitados pelo Núcleo de Qualificação e Certificação de Pessoal (NQCP) do IBRACON.

Para cada amostra analisada foram obtidos 3 resultados de resistência à compressão distintos, um para cada idade. Dessa maneira, as 1.166 amostras contemplam 4.662 resultados de resistências de diferentes traços de concretos produzidos com cimentos tipo CP III 40 e CP V-ARI, para traços de relação w/c de 0,50, 0,45 e 0,40, como detalhado na Tabela E.1.

Tabela E.1 – Cartas de traço dos concretos em kg/m³ e ml/m³.

Traço	f_{ck} [MPa]	Tipo de cimento	w/c	Cimento (kg/m ³)	Areia de quartzo (kg/m ³)	Areia de rocha (kg/m ³)	Brita 0 (kg/m ³)	Brita 1 (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (ml/m ³)
A1	35	CP III 40	0,50	360	449	367	319	744	181	2340
A2	40	CP III 40	0,45	400	426	284	283	850	181	3200
A3	45	CP III 40	0,40	452	363	297	282	845	185	3616
A4	40	CP V-ARI	0,45	409	393	322	281	843	184	1840

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Nas Tabelas E.2, E.3, E.4 e E.5 estão apresentados os resultados de resistência dos traços n. A1, A2, A3 e A4 (Tabela E.1), respectivamente, para as diferentes idades.

Tabela E.2 – Resultados de resistência à compressão aos 7, 28 e 63 dias do concreto traço A1. $f_{ck} = 35$ MPa, $w/c = 0,5$, produzido com CP III 40.

n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)			
	7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias	
1	33,9	56,7	57,8	64,0	41	30,5	40,3	41,5	46,0	81	23,1	33,8	35,1	39,6	121	28,2	42,6	43,4	48,9					
2	42,5	58,9	59,5	65,0	42	31,7	43,3	43,9	48,2	82	18,3	26,3	25,8	30,6	122	28,0	43,0	41,9	48,6					
3	43,1	57,3	58,7	63,9	43	32,1	42,6	41,5	47,3	83	29,8	34,4	35,3	39,7	123	25,7	37,3	38,3	42,0					
4	40,5	54,8	56,4	60,3	44	33,7	40,3	39,4	46,0	84	27,0	33,6	33,1	37,2	124	31,9	37,9	39,8	45,4					
5	53,8	70,2	71,6	78,1	45	26,7	35,5	34,6	41,7	85	31,5	38,5	39,0	43,4	125	27,5	34,2	33,6	39,7					
6	49,5	62,9	64,5	69,0	46	19,1	30,7	30,9	36,6	86	29,2	34,1	35,7	38,9	126	30,5	38,4	37,4	42,2					
7	42,8	55,2	54,1	61,5	47	28,0	40,7	40,0	46,7	87	21,6	28,9	29,9	34,7	127	31,9	39,1	38,6	46,4					
8	45,7	58,9	59,8	64,2	48	21,2	28,8	30,7	37,2	88	32,5	39,1	39,5	43,4	128	41,8	60,6	59,5	66,1					
9	50,8	66,7	68,2	74,1	49	24,1	31,4	31,7	40,9	89	21,3	29,4	30,3	35,0	129	32,1	44,6	43,5	48,8					
10	44,1	58,0	59,1	65,5	50	16,6	35,8	36,9	44,1	90	16,8	21,5	23,2	28,1	130	35,8	51,7	50,7	56,0					
11	45,2	60,3	58,9	66,4	51	17,7	27,9	28,2	35,7	91	17,8	23,5	23,0	29,4	131	35,4	49,0	49,6	55,7					
12	48,7	59,2	60,3	66,4	52	16,2	27,4	27,9	35,7	92	27,2	31,5	31,5	41,6	132	36,5	58,9	59,5	63,6					
13	44,1	60,5	61,7	66,7	53	27,6	42,4	42,4	49,2	93	31,0	33,8	34,1	39,9	133	32,6	40,9	39,8	45,8					
14	37,9	57,4	58,4	64,0	54	26,6	36,0	35,0	45,4	94	28,5	32,5	32,0	38,3	134	30,9	45,3	46,1	50,8					
15	40,5	58,3	59,0	64,1	55	29,7	41,1	39,9	48,7	95	32,6	37,5	39,0	49,4	135	29,9	49,4	50,4	55,8					
16	35,8	58,8	59,7	64,7	56	24,6	34,7	33,8	44,4	96	34,0	37,5	39,0	44,6	136	27,9	37,7	38,5	43,5					
17	45,2	56,8	57,7	63,0	57	29,9	43,8	42,9	48,6	97	29,6	33,6	34,2	39,7	137	28,4	32,6	43,5	48,3					
18	50,5	62,5	63,5	70,1	58	24,7	40,8	41,6	45,9	98	34,6	39,0	39,2	48,7	138	22,4	34,0	34,7	40,3					
19	50,4	63,5	64,9	70,3	59	29,8	37,8	39,4	45,4	99	35,5	47,7	48,3	53,4	139	24,3	33,4	34,0	39,1					
20	50,1	62,6	63,9	69,8	60	31,2	37,9	39,3	44,9	100	32,4	37,5	38,3	44,2	140	23,2	35,1	34,7	39,5					
21	47,7	63,9	65,1	70,3	61	48,7	53,1	54,1	57,4	101	35,3	41,4	40,5	46,6	141	28,8	43,9	43,1	49,1					
22	48,0	67,7	68,9	75,2	62	33,2	41,2	42,4	45,8	102	32,0	36,8	37,1	42,7	142	28,4	49,4	48,4	57,4					
23	51,0	63,5	65,2	72,5	63	29,9	37,2	38,5	43,8	103	31,2	48,1	47,1	52,1	143	26,8	42,1	44,0	49,6					
24	45,4	64,8	65,8	71,3	64	25,7	36,3	37,3	44,4	104	30,9	42,7	43,7	54,2	144	28,0	40,1	41,1	48,6					
25	41,2	54,4	56,3	61,2	65	19,9	29,5	30,0	39,7	105	31,2	45,4	46,4	57,4	145	21,0	32,7	33,5	43,0					
26	40,9	62,7	63,9	69,0	66	21,0	28,5	28,5	39,2	106	35,4	48,9	49,7	57,4	146	19,2	33,8	34,6	39,8					
27	45,6	60,2	61,3	66,3	67	19,5	25,7	26,0	38,5	107	34,1	46,7	47,1	55,3	147	20,5	32,9	33,5	38,5					
28	42,1	57,8	56,6	62,8	68	21,1	27,0	27,5	37,4	108	38,0	49,7	50,6	54,8	148	35,0	47,2	48,0	52,3					
29	39,7	51,6	52,7	57,9	69	21,2	28,6	28,3	39,2	109	39,0	50,6	49,9	56,1	149	26,3	39,8	39,3	44,6					
30	43,4	59,8	60,8	65,5	70	17,2	23,3	23,5	36,8	110	40,5	53,0	52,3	57,3	150	17,9	36,6	37,2	41,9					
31	45,7	58,3	59,2	63,0	71	23,6	33,8	33,5	40,2	111	34,6	43,5	43,0	49,1	151	26,4	41,1	40,3	50,9					
32	30,2	40,8	41,1	44,6	72	21,2	29,3	29,4	35,8	112	34,6	43,5	44,6	49,1	152	33,7	44,2	44,8	48,6					
33	38,4	51,1	51,3	53,5	73	22,1	31,1	29,7	36,2	113	30,8	44,1	43,9	49,9	153	27,3	39,4	40,5	45,8					
34	33,7	44,9	44,7	48,3	74	35,1	39,7	41,2	44,7	114	36,0	44,8	45,8	49,6										
35	37,4	45,3	45,8	49,6	75	31,0	41,0	40,0	44,9	115	32,6	43,2	42,2	50,6										
36	24,4	37,3	38,2	41,2	76	30,8	41,4	41,6	45,1	116	34,6	42,2	43,2	47,6										
37	32,2	44,2	43,2	48,1	77	31,5	42,5	43,9	48,4	117	31,5	42,0	42,2	47,9										
38	27,4	39,7	40,9	44,5	78	34,3	37,5	41,1	46,1	118	26,8	41,3	42,2	49,5										
39	27,4	39,7	40,1	46,4	79	29,0	36,0	37,5	41,3	119	31,6	42,2	44,0	48,2										
40	29,8	42,4	43,1	46,2	80	20,1	34,6	35,1	39,8	120	31,1	44,5	45,4	49,7										

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Tabela E.3. Continua – Resultados de resistência à compressão aos 7, 28 e 63 dias do concreto traço A2. $f_{ck} = 40$ MPa, $w/c = 0,45$, produzido com CP III 40.

n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)			
	7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias	
1	33,8	38,8	38,8	40,4	41	40,0	54,9	55,3	60,5	81	41,8	51,5	52,7	56,3	121	32,9	44,2	43,6	47,8	161	41,9	54,9	55,3	60,5
2	34,3	48,8	47,6	53,1	42	42,9	57,0	57,9	62,9	82	36,5	46,3	47,2	49,3	122	38,4	42,9	43,8	49,2	162	39,9	53,2	54,0	58,4
3	34,1	50,1	48,8	55,9	43	40,5	52,8	54,0	59,9	83	33,7	45,1	46,0	48,3	123	28,7	44,0	42,8	48,9	163	36,7	51,4	50,4	54,9
4	41,3	55,1	53,8	61,1	44	37,9	52,0	52,7	59,0	84	35,0	45,2	46,1	49,8	124	32,5	43,5	44,0	48,1	164	36,3	49,9	50,1	53,3
5	38,5	48,5	49,1	61,0	45	37,5	47,7	46,7	52,9	85	32,4	44,6	44,0	49,8	125	34,7	42,8	43,5	48,4	165	36,2	53,0	53,8	57,8
6	45,0	60,3	59,3	65,8	46	43,0	53,9	53,0	60,2	86	31,3	44,6	46,2	49,6	126	33,5	45,2	46,1	49,4	166	31,2	41,7	42,5	44,6
7	38,6	57,6	56,3	63,0	47	41,2	53,7	54,8	60,4	87	31,0	48,6	47,7	52,3	127	32,4	45,0	44,1	48,5	167	33,7	48,7	48,0	53,5
8	36,0	50,4	50,0	55,4	48	37,1	50,0	50,6	56,5	88	31,9	45,3	44,9	49,8	128	30,2	42,7	43,4	47,6	168	33,2	51,2	50,2	54,5
9	35,0	50,2	49,1	57,4	49	35,0	49,7	49,0	55,3	89	29,2	41,6	41,0	49,1	129	34,0	39,1	48,6	56,7	169	35,7	46,5	47,7	51,1
10	33,0	48,2	47,5	55,3	50	33,7	50,0	49,0	55,8	90	29,4	44,7	44,0	47,9	130	31,3	46,0	44,8	50,4	170	33,6	45,3	46,1	48,6
11	30,6	43,8	42,9	48,4	51	32,5	44,1	45,2	52,5	91	30,1	44,5	44,0	48,8	131	37,3	45,9	45,0	50,5	171	31,1	41,4	42,2	47,3
12	36,4	47,5	46,3	56,4	52	33,1	45,1	46,0	49,8	92	33,3	45,5	45,2	49,4	132	40,2	44,9	44,4	50,2	172	35,0	48,4	47,8	53,9
13	33,9	46,7	47,5	55,2	53	37,0	54,1	53,1	58,9	93	33,6	46,0	45,3	52,3	133	40,6	46,2	46,1	52,6	173	37,5	43,5	44,1	50,6
14	33,7	48,9	47,8	56,3	54	31,4	46,3	45,5	51,2	94	36,1	44,2	43,9	49,6	134	37,9	45,2	45,4	50,9	174	34,9	50,6	49,5	55,5
15	37,7	50,8	50,2	57,7	55	28,3	47,0	46,5	54,2	95	36,7	46,0	45,2	50,2	135	37,7	45,2	44,4	51,2	175	32,3	48,7	47,7	54,0
16	34,0	56,9	56,3	62,8	56	30,7	51,0	50,1	54,1	96	34,4	44,0	45,0	47,6	136	38,0	44,0	42,7	48,6	176	33,4	48,1	47,0	54,3
17	39,1	57,6	56,5	63,0	57	32,3	48,5	48,0	55,6	97	37,5	46,0	45,2	50,3	137	34,9	44,0	43,4	47,1	177	34,7	50,5	49,5	54,5
18	35,4	50,4	49,7	56,2	58	31,5	50,5	49,5	57,2	98	30,3	41,4	40,4	44,7	138	33,8	40,4	41,0	44,8	178	35,4	50,3	49,6	54,5
19	32,5	48,4	47,8	53,8	59	30,0	48,2	47,2	57,8	99	35,9	46,4	45,5	50,7	139	30,5	36,4	37,7	41,0	179	36,0	50,5	49,6	55,3
20	35,6	43,8	43,4	53,0	60	27,7	50,0	50,6	58,1	100	36,6	46,4	47,0	51,7	140	34,5	38,4	38,9	46,5	180	35,4	50,7	50,2	54,4
21	31,5	50,4	49,2	54,2	61	30,1	47,4	47,6	55,9	101	30,9	45,4	44,5	50,1	141	32,9	40,6	40,1	46,1	181	36,0	48,7	50,8	55,3
22	32,3	49,3	48,7	54,8	62	31,4	42,9	43,3	56,5	102	24,4	46,6	45,7	49,6	142	33,4	42,2	41,0	46,6	182	30,7	46,6	46,0	49,8
23	33,1	49,3	48,2	54,4	63	25,7	45,2	45,7	55,7	103	25,6	45,3	44,0	48,7	143	35,0	45,1	44,0	48,3	183	33,9	46,6	47,5	52,0
24	31,6	48,7	47,7	54,1	64	28,9	45,8	47,1	54,5	104	31,5	46,6	46,0	52,4	144	33,5	38,9	39,8	44,2	184	34,3	46,7	47,7	53,5
25	31,6	47,1	46,5	51,6	65	28,8	47,3	47,3	57,6	105	36,5	49,8	50,3	55,4	145	32,2	40,0	40,4	45,3	185	33,7	47,6	46,6	51,8
26	31,0	47,0	46,5	51,1	66	23,6	46,9	46,1	54,9	106	36,6	52,5	51,6	57,8	146	31,9	38,4	37,2	42,5	186	33,9	48,6	47,7	52,1
27	32,9	46,4	45,3	53,9	67	33,9	45,9	46,1	54,3	107	40,1	50,6	51,5	55,3	147	30,7	39,7	38,9	41,8	187	37,3	49,9	49,1	53,6
28	30,0	42,1	41,5	47,2	68	35,7	44,6	45,7	53,1	108	39,8	53,5	54,0	59,2	148	37,3	44,0	43,5	47,8	188	36,1	49,7	49,1	54,4
29	32,2	45,3	44,7	51,3	69	32,5	47,1	47,3	58,1	109	35,7	49,4	50,2	55,7	149	35,3	43,4	44,1	47,8	189	32,0	45,9	45,5	55,0
30	29,0	46,3	45,3	50,9	70	30,2	46,7	46,5	55,5	110	34,2	49,2	48,0	54,5	150	35,0	42,8	42,4	48,2	190	33,6	47,1	47,7	50,4
31	29,9	45,6	45,0	49,2	71	32,2	47,7	48,3	60,2	111	32,9	46,5	45,7	54,0	151	32,0	43,3	44,0	47,1	191	32,0	43,2	42,7	47,2
32	30,8	46,2	45,4	52,2	72	38,9	53,8	53,9	61,5	112	35,5	48,0	49,0	54,0	152	36,0	46,3	47,8	52,5	192	34,3	45,8	46,5	50,7
33	28,6	46,6	46,0	50,4	73	38,5	45,5	45,8	49,6	113	37,1	49,8	50,3	54,6	153	37,7	46,5	47,7	51,0	193	30,2	45,3	44,6	54,1
34	29,8	43,7	42,8	46,6	74	31,8	39,9	40,9	47,7	114	35,0	45,8	45,5	51,4	154	42,0	51,0	50,3	55,8	194	31,4	43,6	44,6	52,8
35	27,7	37,3	37,7	45,6	75	33,6	44,9	45,5	52,8	115	35,0	48,7	47,8	52,6	155	33,2	44,1	43,6	49,7	195	32,0	41,0	40,3	48,9
36	31,1	49,6	48,9	54,4	76	31,4	39,8	40,4	45,3	116	35,5	45,9	45,3	49,8	156	33,6	50,6	49,6	53,4	196	27,6	38,9	38,4	46,5
37	26,2	50,8	50,1	56,8	77	31,3	41,4	41,6	49,8	117	28,7	42,4	41,5	49,2	157	35,0	49,5	50,2	52,3	197	27,8	43,9	43,2	52,8
38	27,5	49,1	47,9	55,1	78	33,9	43,3	42,8	46,9	118	36,9	45,2	44,8	49,3	158	33,6	43,1	44,0	46,3	198	31,5	41,2	40,7	50,8
39	31,7	48,8	47,8	54,0	79	38,2	49,1	49,7	53,3	119	34,0	42,9	42,1	46,5	159	23,3	44,8	42,8	50,1	199	28,3	39,0	40,9	52,6
40	39,9	55,2	55,9	61,6	80	37,5	47,8	47,0	53,1	120	34,6	42,7	42,0	48,7	160	38,7	52,6	53,8	57,0	200	36,6	43,0	42,2	52,8

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Tabela E.3. Continuação – Resultados de resistência à compressão aos 7, 28 e 63 dias do concreto traço A2. $f_{ck} = 40$ MPa, $w/c = 0,45$, produzido com CP III 40.

n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)			
	7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias	
201	34,1	42,2	43,4	53,9	241	30,4	41,6	40,9	45,0	281	32,2	49,2	50,3	54,9					
202	32,6	42,4	43,4	47,9	242	35,5	42,8	42,0	46,0	282	42,0	58,8	60,2	65,3					
203	35,4	45,2	44,6	55,3	243	35,5	40,7	40,2	46,1	283	42,5	59,1	60,5	65,3					
204	34,3	42,2	41,4	52,2	244	31,6	37,2	36,1	41,4	284	32,5	46,2	47,0	51,4					
205	31,4	40,2	40,9	50,8	245	33,7	40,0	40,9	45,9	285	46,4	66,7	68,3	73,7					
206	25,2	37,7	38,4	46,6	246	33,9	41,0	41,8	44,7	286	33,0	48,4	49,2	53,6					
207	31,8	41,1	41,8	50,8	247	32,2	42,8	43,4	48,0	287	30,9	48,9	50,1	55,4					
208	31,2	44,7	44,1	52,7	248	29,8	42,9	43,7	50,9	288	27,5	39,5	39,0	43,2					
209	30,5	43,1	42,2	50,8	249	29,8	40,4	40,9	47,1	289	25,0	40,6	41,1	45,4					
210	29,9	39,1	39,7	50,3	250	37,9	48,1	48,9	53,9	290	25,0	40,4	41,0	45,6					
211	30,2	44,6	43,9	54,2	251	33,9	37,6	36,5	41,0	291	41,2	52,8	53,7	59,4					
212	31,7	43,3	42,3	46,5	252	41,4	54,9	55,9	58,7	292	38,5	44,8	43,9	52,1					
213	30,6	42,0	42,5	45,0	253	26,3	37,7	37,1	41,9	293	38,6	50,8	51,6	56,1					
214	33,5	47,2	46,0	50,6	254	18,9	37,4	38,9	41,1	294	27,6	37,3	36,7	41,5					
215	36,6	42,8	42,3	45,6	255	29,8	44,6	43,4	47,2	295	40,2	53,6	54,7	59,8					
216	33,4	41,4	40,8	44,7	256	34,1	48,3	47,3	50,8	296	41,0	54,0	55,3	60,9					
217	35,0	43,5	42,5	47,3	257	33,7	40,9	40,2	47,8	297	36,9	46,1	47,3	54,3					
218	32,4	40,9	41,2	43,4	258	35,5	45,4	44,7	52,3	298	32,4	56,6	54,7	62,0					
219	31,2	41,9	42,2	47,9	259	34,4	41,2	43,1	45,8	299	36,1	39,4	39,9	58,3					
220	28,7	42,2	42,3	43,9	260	40,3	47,5	47,5	51,5	300	33,6	43,8	44,6	49,0					
221	31,7	41,1	42,2	44,1	261	40,4	49,6	50,3	55,2	301	27,3	38,7	38,6	45,3					
222	28,7	41,4	41,2	48,9	262	29,7	38,5	39,1	41,6	302	50,9	57,0	55,7	67,1					
223	32,4	41,4	42,2	46,4	263	36,1	43,2	44,0	51,0	303	49,6	59,9	59,5	70,1					
224	31,2	41,7	41,4	45,3	264	31,9	41,8	42,7	50,0	304	37,5	43,9	44,2	51,3					
225	31,3	42,3	42,9	48,5	265	29,9	38,4	37,8	42,5	305	38,5	45,4	45,8	51,2					
226	26,1	42,3	40,6	44,8	266	28,4	40,7	40,2	43,5	306	45,4	52,0	52,2	59,0					
227	27,8	40,7	41,5	44,5	267	28,6	38,9	38,4	42,9	307	37,7	50,7	51,7	56,7					
228	31,3	42,6	43,6	47,2	268	25,5	41,0	40,4	44,0	308	21,0	40,8	41,3	45,2					
229	29,8	40,8	39,8	45,5	269	26,6	38,5	37,7	44,6										
230	28,4	39,7	40,1	46,4	270	39,0	42,4	43,5	51,7										
231	33,6	42,2	43,0	50,1	271	35,9	40,0	40,9	50,0										
232	42,7	46,4	47,1	51,0	272	33,2	40,8	41,0	52,8										
233	39,9	46,0	47,1	54,2	273	29,7	40,3	41,3	45,1										
234	37,6	47,9	48,4	56,2	274	29,5	38,3	37,9	42,2										
235	25,8	33,7	36,8	39,9	275	37,5	49,3	50,3	56,5										
236	30,1	35,7	35,9	41,0	276	36,1	47,5	48,5	54,0										
237	27,0	32,7	30,1	35,5	277	28,7	39,2	38,3	42,1										
238	35,1	40,1	40,9	46,3	278	29,5	40,7	41,2	45,6										
239	32,4	43,8	41,7	47,5	279	25,5	35,9	36,6	41,2										
240	24,7	33,7	34,7	38,1	280	42,4	56,6	58,0	62,5										

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Tabela E.4 – Resultados de resistência à compressão aos 7, 28 e 63 dias do concreto traço A3. $f_{ck} = 45$ MPa, $w/c = 0,40$, produzido com CP III 40.

n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)			
	7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias	
1	29,4	50,4	49,8	52,9	41	38,1	55,1	55,7	59,6	81	35,1	52,2	53,3	57,0	121	35,6	47,1	48,1	54,1	161	34,7	43,8	43,7	48,6
2	30,6	50,6	50,2	57,9	42	38,2	48,9	49,7	53,1	82	34,7	49,5	50,3	55,5	122	39,8	48,4	49,3	53,3	162	34,3	45,1	44,9	49,9
3	31,1	50,0	49,0	59,8	43	36,1	51,4	52,4	56,0	83	34,9	53,1	54,1	60,0	123	37,8	49,5	48,6	54,7	163	34,2	45,1	43,8	52,2
4	32,2	51,5	52,3	54,2	44	38,5	50,2	50,5	55,2	84	33,7	46,8	47,3	55,8	124	38,1	45,9	46,6	52,8	164	33,4	43,0	42,5	47,3
5	34,2	50,2	51,2	54,7	45	37,8	53,6	54,5	58,2	85	33,9	48,3	48,9	55,8	125	38,6	52,2	52,8	56,6	165	36,0	43,1	41,4	48,3
6	34,6	50,3	49,1	53,1	46	34,8	51,8	53,0	57,4	86	33,0	45,6	46,4	54,5	126	33,7	37,9	37,3	46,2	166	35,5	46,3	45,0	50,8
7	38,2	54,1	53,4	59,8	47	41,2	57,4	58,0	62,0	87	38,6	52,1	53,1	65,2	127	34,3	47,8	48,7	52,7	167	32,7	43,0	43,7	47,6
8	38,3	52,1	52,8	58,4	48	37,3	57,6	58,5	61,9	88	38,5	53,7	54,6	58,3	128	32,1	44,1	45,2	50,2	168	37,6	53,6	52,5	61,3
9	37,4	53,8	54,5	59,0	49	39,6	54,3	56,7	61,9	89	33,4	49,6	50,8	60,0	129	44,2	51,0	51,6	57,4	169	24,9	35,4	36,0	40,4
10	34,9	52,1	52,8	59,1	50	36,9	47,9	49,0	53,2	90	35,1	44,6	45,8	53,3	130	35,0	50,1	50,8	55,7	170	25,2	36,8	37,4	42,1
11	41,1	53,1	54,0	59,0	51	35,9	46,5	47,7	52,0	91	34,9	44,5	45,0	54,1	131	32,6	43,1	44,0	49,2	171	38,0	53,3	54,1	60,7
12	36,0	49,9	50,5	54,8	52	35,8	48,7	49,7	53,4	92	33,6	48,6	49,7	55,3	132	32,9	43,1	44,0	49,4	172	31,6	49,1	49,6	57,4
13	39,5	52,7	53,7	60,2	53	34,7	47,4	48,0	52,1	93	39,0	55,7	56,6	61,5	133	37,7	56,0	57,0	62,1	173	39,4	51,5	52,6	58,0
14	45,1	53,2	54,0	58,9	54	35,6	49,0	50,2	54,9	94	33,6	45,3	44,6	54,1	134	33,6	45,8	46,5	53,6	174	44,4	60,5	61,6	68,0
15	40,2	48,9	49,5	55,6	55	30,0	43,1	44,0	52,8	95	33,5	44,5	45,4	53,9	135	29,9	41,5	40,7	46,3	175	36,8	54,4	55,3	60,7
16	40,1	51,0	51,6	57,3	56	24,8	38,0	38,9	45,4	96	30,4	52,3	53,3	60,3	136	25,0	35,6	35,2	41,6					
17	40,7	52,8	54,0	60,3	57	24,5	38,4	39,1	48,5	97	30,6	44,2	43,4	50,8	137	36,1	47,5	48,2	54,0					
18	39,1	49,8	50,4	55,2	58	36,5	50,3	51,5	56,0	98	31,3	47,0	45,9	54,8	138	32,3	45,5	45,0	51,2					
19	38,8	52,8	53,8	59,0	59	33,6	53,7	54,1	58,3	99	31,0	48,5	47,6	54,9	139	38,6	51,9	52,7	59,5					
20	39,9	50,1	50,5	54,2	60	34,9	45,9	46,6	50,8	100	39,9	49,6	49,2	60,3	140	38,4	49,7	48,8	54,7					
21	42,3	54,0	55,1	59,8	61	40,2	54,8	54,0	59,5	101	37,7	48,1	47,1	55,3	141	32,8	43,8	44,9	49,3					
22	38,6	48,0	47,5	52,2	62	41,3	52,9	54,0	58,5	102	37,3	44,7	44,1	48,6	142	41,0	51,4	52,3	57,2					
23	37,9	50,3	51,5	54,3	63	33,9	53,7	54,4	57,9	103	39,0	48,9	48,4	53,5	143	32,9	45,4	44,9	49,6					
24	34,0	46,6	46,0	55,2	64	33,5	50,9	51,6	54,9	104	39,1	51,8	50,8	55,4	144	29,7	33,0	34,1	48,8					
25	35,6	49,7	49,0	53,0	65	31,5	49,9	50,5	53,4	105	41,2	48,1	48,4	52,3	145	36,5	43,2	42,5	59,2					
26	36,4	47,6	46,7	56,8	66	31,5	45,9	45,2	49,3	106	36,2	49,8	49,0	53,6	146	39,7	49,5	49,1	54,5					
27	29,3	50,9	49,6	56,6	67	34,0	50,0	50,5	53,9	107	36,0	45,7	44,9	50,2	147	43,3	51,1	52,0	56,1					
28	38,5	49,5	50,1	59,3	68	30,2	51,9	52,7	56,9	108	40,4	48,4	47,6	53,1	148	44,5	50,6	50,4	55,6					
29	35,0	45,9	47,1	54,0	69	33,7	48,2	49,0	53,3	109	36,7	52,8	52,0	57,2	149	43,1	48,8	49,4	53,8					
30	40,2	44,3	45,2	55,2	70	30,3	47,1	47,7	52,3	110	40,6	46,2	45,6	50,0	150	31,7	40,7	41,2	46,2					
31	38,9	57,8	58,5	62,2	71	33,3	44,7	45,9	54,1	111	36,3	46,9	46,0	54,1	151	41,8	50,8	51,1	54,9					
32	37,4	55,4	56,6	60,9	72	34,5	45,8	46,4	52,6	112	39,4	48,4	49,5	52,4	152	45,1	52,4	52,6	57,4					
33	40,2	53,0	54,1	58,3	73	33,8	45,6	46,6	54,1	113	36,8	48,0	48,5	52,6	153	44,0	52,5	53,1	58,2					
34	40,7	51,7	52,8	57,0	74	38,0	50,7	49,7	54,9	114	37,6	50,9	50,3	54,6	154	44,1	51,5	51,1	56,1					
35	38,1	52,6	53,3	57,9	75	37,8	52,8	53,7	58,3	115	42,0	50,6	51,6	55,1	155	38,7	52,6	52,0	57,4					
36	38,7	57,0	57,9	62,0	76	38,6	47,0	47,9	55,8	116	39,9	49,5	48,4	54,1	156	42,4	50,6	51,1	56,1					
37	35,5	54,0	55,2	60,5	77	37,7	50,8	51,6	59,0	117	38,0	46,1	47,1	50,7	157	47,9	54,5	54,9	58,6					
38	37,7	52,4	53,4	57,8	78	36,0	54,1	53,6	58,3	118	37,3	45,4	44,6	48,7	158	38,2	45,1	47,3	52,1					
39	34,7	51,6	52,7	57,8	79	40,1	52,3	51,8	57,0	119	39,3	48,9	48,0	54,4	159	37,1	45,0	45,9	50,4					
40	37,8	56,8	56,4	60,9	80	38,9	50,0	49,6	57,0	120	37,4	46,5	47,2	53,4	160	33,7	40,2	41,7	45,9					

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Tabela E.5. Continua – Resultados de resistência à compressão aos 7, 28 e 63 dias do concreto traço A4. $f_{ck} = 40$ MPa, $w/c = 0,45$, produzido com CP V-ARI.

n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)			
	7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias	
1	31,2	43,3	42,5	46,1	41	42,4	54,0	52,9	60,2	81	36,6	48,7	49,5	52,1	121	36,3	43,4	42,4	49,3	161	34,6	42,9	42,3	49,8
2	32,8	46,5	47,4	51,1	42	42,2	47,0	46,4	52,5	82	36,4	49,9	50,2	54,2	122	35,0	46,0	47,0	50,4	162	34,5	44,3	43,4	51,2
3	27,2	33,7	32,9	38,2	43	36,8	42,7	41,8	48,4	83	35,7	47,6	49,1	52,8	123	30,9	42,2	41,7	51,6	163	35,3	44,0	45,2	47,3
4	30,2	39,0	38,8	44,8	44	37,5	51,6	52,7	58,5	84	38,4	50,6	49,7	56,5	124	42,4	48,9	49,7	52,4	164	33,3	41,5	42,5	45,0
5	31,0	38,9	38,1	43,9	45	38,0	47,7	46,6	51,0	85	34,0	47,2	46,3	52,7	125	39,8	46,4	45,3	48,9	165	31,7	43,6	42,7	47,7
6	30,6	36,8	38,3	42,5	46	34,8	45,6	44,8	49,5	86	31,2	43,6	44,3	49,8	126	32,9	38,1	38,9	42,9	166	29,7	40,4	41,4	45,0
7	31,4	40,4	40,8	46,2	47	37,8	44,9	45,3	50,3	87	32,6	37,0	37,8	45,8	127	35,1	43,8	42,8	47,0	167	34,9	47,2	46,5	49,6
8	39,5	44,6	44,1	46,6	48	37,6	48,2	49,0	52,2	88	35,1	44,2	45,3	49,6	128	37,3	45,8	46,5	49,9	168	32,6	44,0	43,0	46,5
9	35,5	40,2	40,6	43,6	49	40,7	46,6	47,7	50,8	89	33,3	44,0	43,1	48,2	129	32,5	45,2	46,2	49,2	169	35,6	46,4	46,0	49,7
10	34,0	37,5	37,4	42,0	50	41,2	51,1	51,5	55,2	90	35,3	45,2	46,1	49,0	130	33,7	47,3	46,8	50,6	170	32,7	47,5	46,5	50,6
11	28,5	42,4	42,4	45,0	51	42,8	52,6	53,0	55,3	91	35,6	44,0	43,0	48,1	131	33,7	43,2	42,6	46,6	171	33,5	45,0	45,5	48,5
12	27,2	34,0	34,6	40,2	52	40,5	50,1	49,1	52,7	92	37,7	42,9	42,5	47,2	132	31,6	44,9	45,3	50,3	172	35,9	44,8	45,2	48,5
13	28,5	42,4	42,4	45,0	53	40,3	48,5	47,7	51,3	93	33,7	46,0	46,5	49,9	133	27,6	42,0	41,5	46,7	173	34,9	46,3	47,4	51,1
14	33,9	40,5	41,4	43,9	54	43,9	54,0	53,6	59,0	94	35,0	42,6	41,5	48,7	134	30,1	40,7	40,2	46,3	174	37,5	45,2	44,3	53,4
15	28,9	35,7	35,3	41,4	55	37,7	48,5	47,8	51,3	95	31,3	44,5	45,2	51,8	135	33,1	41,4	41,2	49,4	175	31,4	47,0	47,7	52,3
16	31,4	42,3	42,8	46,6	56	37,8	49,0	48,1	51,3	96	36,0	48,5	47,6	53,1	136	34,5	52,2	53,0	58,2	176	31,2	43,8	44,5	47,7
17	32,0	45,7	45,2	49,5	57	33,8	45,3	44,9	50,2	97	30,1	48,9	47,7	51,4	137	37,9	48,2	47,6	53,6	177	31,1	48,0	49,0	53,3
18	32,1	41,6	42,6	48,1	58	38,5	49,1	48,5	53,3	98	33,3	46,2	45,3	59,1	138	33,5	44,0	44,8	50,4	178	31,1	41,0	40,6	50,3
19	31,6	48,0	46,8	52,0	59	35,9	41,6	42,8	47,1	99	30,0	43,2	44,0	48,9	139	37,4	46,3	45,9	52,5	179	36,0	49,8	49,0	55,9
20	33,9	40,7	40,2	46,5	60	31,7	45,9	45,9	53,6	100	35,7	47,4	47,8	53,9	140	32,7	43,5	44,0	51,1	180	32,3	48,0	47,1	55,3
21	37,7	44,0	43,1	48,9	61	37,6	44,8	45,9	50,1	101	34,8	47,3	47,8	53,0	141	29,8	40,7	41,7	47,0	181	23,4	42,9	42,2	50,8
22	30,6	42,3	42,8	56,6	62	33,7	35,0	35,6	48,7	102	33,2	49,1	50,2	53,7	142	35,6	43,4	45,5	49,6	182	22,7	46,8	46,0	55,8
23	35,5	48,9	48,2	51,2	63	35,4	41,5	42,1	47,5	103	31,3	43,9	44,7	47,4	143	36,8	44,6	44,8	49,1	183	22,6	44,6	43,5	53,3
24	34,4	46,1	45,3	48,9	64	39,9	44,4	45,3	50,0	104	35,6	45,2	46,0	51,5	144	37,2	40,7	41,0	43,7	184	33,1	43,5	42,9	52,1
25	36,0	47,7	48,3	54,0	65	40,5	51,5	50,7	54,4	105	37,3	46,4	45,2	51,9	145	38,7	45,9	46,6	50,7	185	34,0	46,7	47,5	57,0
26	36,6	41,5	42,1	48,5	66	36,4	47,8	48,7	51,5	106	38,2	42,6	44,1	49,3	146	34,8	40,9	41,9	49,7	186	34,8	46,6	47,4	55,2
27	35,0	44,1	45,0	49,8	67	32,4	42,8	42,3	47,5	107	33,6	44,0	45,2	49,1	147	34,3	42,7	43,8	45,9	187	33,7	44,2	45,1	53,3
28	30,0	40,4	40,8	43,6	68	29,3	43,4	44,0	47,7	108	33,5	42,7	42,3	45,8	148	36,5	45,2	46,5	50,4	188	33,8	48,1	49,2	55,8
29	30,3	38,7	38,0	44,6	69	31,6	42,7	43,6	47,2	109	38,3	43,9	42,7	47,1	149	35,0	45,1	46,0	49,0	189	31,4	45,0	44,6	52,6
30	35,9	49,2	48,9	53,0	70	32,7	40,4	40,8	44,1	110	37,6	44,1	45,2	48,1	150	30,6	41,7	42,5	48,1	190	31,4	37,2	37,6	42,2
31	31,5	37,9	38,9	43,6	71	38,3	49,0	47,8	59,8	111	38,8	42,2	42,8	47,0	151	33,7	41,4	42,5	48,5	191	35,0	42,9	43,5	44,6
32	31,1	38,7	39,1	45,4	72	31,4	46,2	46,5	50,2	112	36,2	42,3	42,3	46,9	152	30,3	41,1	41,2	47,0	192	32,6	42,0	41,4	42,2
33	36,1	47,9	48,7	51,6	73	33,5	50,2	49,0	51,5	113	37,9	43,9	44,9	48,7	153	33,3	41,4	41,6	46,1	193	32,5	40,8	41,7	54,0
34	35,0	43,8	42,8	48,5	74	33,7	45,1	45,8	48,3	114	36,7	41,2	40,7	45,2	154	34,1	45,6	46,5	48,9	194	34,5	39,3	38,7	54,8
35	35,0	45,2	44,8	52,7	75	37,3	44,5	44,0	47,0	115	32,6	38,8	39,7	42,7	155	32,8	44,4	43,9	47,0	195	33,7	46,8	45,9	55,8
36	33,7	41,7	41,1	52,6	76	50,6	62,8	64,0	69,4	116	33,3	40,2	39,7	44,5	156	33,5	40,0	39,7	43,3	196	33,3	39,1	38,6	49,7
37	36,0	45,4	45,0	49,9	77	43,8	58,0	56,9	64,0	117	35,6	42,5	41,5	45,2	157	31,3	45,1	46,0	48,5	197	30,9	39,9	40,3	40,5
38	32,6	44,0	43,7	48,9	78	33,4	44,0	44,7	47,2	118	35,5	38,1	39,4	48,7	158	31,2	49,2	48,2	52,2	198	32,6	40,3	40,8	41,4
39	34,8	45,2	46,0	51,1	79	34,0	47,6	46,5	51,2	119	41,7	46,0	44,5	50,5	159	31,2	41,5	42,7	48,5	199	32,4	40,9	40,4	40,9
40	41,1	53,7	54,1	60,2	80	36,2	47,7	48,5	50,5	120	39,7	44,6	43,8	51,8	160	34,6	42,5	43,3	47,1	200	38,3	43,9	43,5	58,3

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Tabela E.5. Continuação – Resultados de resistência à compressão aos 7, 28 e 63 dias do concreto traço A4. $f_{ck} = 40$ MPa, $w/c = 0,45$, produzido com CP V-ARI.

n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)			
	7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias	
201	37,7	45,7	46,5	53,3	241	30,0	39,3	39,7	43,7	281	35,0	44,8	44,6	48,4	321	36,1	45,9	46,4	50,6	361	29,8	38,5	39,3	44,9
202	37,7	44,5	45,4	53,4	242	35,9	44,1	44,6	48,3	282	31,3	41,6	42,6	45,8	322	36,8	42,2	43,4	46,5	362	27,2	38,1	38,7	42,2
203	33,2	43,0	43,4	49,7	243	32,1	41,4	41,7	44,8	283	27,7	38,7	37,8	41,0	323	32,2	37,5	37,0	41,3	363	30,9	34,1	34,7	42,7
204	33,7	40,9	41,3	53,8	244	28,7	41,4	40,4	45,4	284	31,3	44,9	43,8	47,0	324	34,4	42,7	42,0	46,6	364	30,5	41,0	40,2	44,7
205	32,5	33,6	34,7	45,9	245	32,4	42,2	43,4	47,2	285	30,0	38,4	38,1	43,2	325	33,4	37,7	38,5	42,1	365	31,7	40,7	40,0	43,7
206	32,4	41,4	42,2	47,9	246	34,2	42,2	41,4	45,9	286	21,3	33,4	33,9	37,4	326	38,9	44,5	43,8	48,4	366	33,4	42,0	42,5	45,0
207	31,2	39,0	38,3	45,9	247	35,2	43,4	43,9	47,1	287	27,5	35,4	36,1	39,8	327	38,3	45,9	45,4	48,1	367	34,9	44,0	44,7	47,9
208	28,7	36,6	37,2	48,4	248	31,2	38,9	39,7	46,2	288	34,1	41,6	40,9	44,7	328	33,0	40,5	40,1	48,1	368	37,9	41,1	41,9	49,9
209	33,5	45,8	44,7	50,8	249	31,2	39,7	40,4	43,9	289	34,2	40,0	40,3	43,1	329	34,9	42,2	41,1	46,5	369	36,1	40,5	41,0	48,5
210	25,3	39,6	39,1	45,9	250	33,7	45,9	41,7	48,5	290	34,5	42,2	43,0	51,7	330	31,0	46,5	45,4	50,8	370	30,1	37,6	38,5	40,8
211	29,7	42,0	42,5	47,2	251	31,2	42,2	41,5	45,4	291	34,5	42,9	43,9	50,2	331	28,7	44,0	45,1	49,6	371	34,9	40,9	39,9	45,8
212	34,6	38,3	38,9	46,4	252	32,3	42,2	41,8	46,7	292	41,0	48,0	46,8	53,4	332	31,6	47,0	45,8	50,7	372	34,6	39,1	39,7	43,4
213	30,6	39,0	39,4	46,6	253	35,0	48,4	48,8	52,3	293	31,3	38,8	38,2	43,5	333	27,4	42,0	41,1	46,0	373	35,6	40,9	40,2	44,6
214	28,4	33,5	32,9	42,2	254	32,2	43,6	43,4	46,6	294	35,2	42,5	41,1	46,3	334	29,8	35,8	37,0	46,1	374	36,5	41,0	42,2	45,9
215	30,4	41,2	42,2	47,2	255	33,2	43,4	43,5	47,0	295	31,3	39,0	39,7	43,3	335	31,7	36,4	35,8	41,2	375	30,0	34,7	33,6	40,8
216	31,9	39,3	39,7	47,6	256	32,6	41,2	41,7	44,5	296	35,2	46,1	47,1	49,4	336	33,8	41,4	40,2	43,4	376	29,6	33,2	33,5	38,9
217	35,7	43,9	43,3	51,6	257	36,1	44,6	43,9	47,5	297	36,3	47,9	48,5	52,1	337	34,4	43,9	43,6	47,0	377	29,8	38,4	37,4	40,0
218	31,1	39,2	39,8	49,1	258	33,7	43,4	42,3	48,1	298	35,0	43,4	44,0	47,4	338	31,9	38,9	37,5	41,6	378	28,5	38,4	38,3	42,5
219	34,1	46,3	45,9	49,7	259	31,8	42,2	42,3	45,9	299	28,9	42,2	41,2	47,1	339	42,3	45,8	44,4	49,0	379	30,1	38,7	37,5	40,4
220	25,3	36,8	37,7	40,2	260	37,5	43,4	43,9	51,7	300	34,3	44,8	44,5	49,9	340	38,9	41,7	42,5	45,7	380	30,6	55,8	56,2	60,5
221	33,1	44,0	43,4	48,1	261	29,6	41,2	42,2	44,6	301	27,6	40,3	39,6	44,3	341	38,8	43,5	45,1	51,8	381	25,3	33,8	34,8	38,3
222	31,1	42,7	43,5	47,1	262	32,6	43,4	43,5	48,5	302	29,0	40,8	39,9	45,3	342	36,3	44,8	43,7	49,8	382	32,8	47,1	46,0	51,1
223	32,6	43,5	44,5	48,1	263	30,0	42,2	43,4	46,5	303	24,9	33,6	32,6	37,0	343	35,0	43,8	43,3	47,9	383	30,0	38,5	39,5	42,6
224	30,1	39,8	40,9	45,4	264	36,1	47,9	46,0	51,6	304	25,8	36,4	37,2	42,1	344	35,0	40,5	40,0	43,9	384	25,3	35,8	36,5	39,0
225	36,2	46,5	47,1	52,1	265	30,2	42,2	42,3	44,8	305	32,3	40,3	40,7	45,4	345	35,1	44,3	43,0	49,1	385	27,2	36,7	36,0	40,0
226	32,5	42,9	43,4	50,8	266	36,1	44,1	44,6	49,4	306	36,3	45,9	46,7	50,0	346	33,2	42,2	41,4	47,5	386	27,4	38,5	37,9	44,3
227	29,9	40,9	41,2	46,4	267	30,1	40,2	40,9	46,2	307	34,4	42,6	43,4	49,9	347	36,3	45,6	43,7	49,2	387	25,7	36,0	37,2	40,2
228	31,2	40,4	41,7	50,3	268	35,2	44,1	43,4	49,0	308	31,4	37,2	38,0	42,4	348	34,3	38,9	38,4	42,3	388	28,7	37,2	37,9	43,2
229	32,8	44,5	45,3	48,3	269	34,2	42,2	42,9	48,1	309	36,7	41,0	41,7	45,3	349	44,8	50,8	49,8	53,9	389	30,2	39,5	39,9	43,0
230	30,2	45,6	44,6	47,8	270	28,7	41,0	42,2	43,1	310	38,0	42,1	41,7	44,0	350	35,1	42,2	42,9	46,1	390	29,3	40,6	42,8	45,9
231	34,7	41,9	41,1	44,9	271	38,2	45,9	46,6	51,6	311	45,2	50,2	49,7	52,8	351	28,8	34,8	36,0	39,6	391	35,5	44,4	43,4	47,2
232	37,8	40,9	40,2	45,8	272	32,9	41,7	42,2	45,9	312	42,4	48,0	48,4	49,8	352	37,5	42,9	43,4	46,7	392	34,2	44,9	45,9	50,1
233	34,1	44,7	45,3	47,1	273	34,1	43,5	43,4	51,6	313	36,4	45,4	46,1	50,3	353	36,2	42,4	42,1	49,3	393	31,0	40,9	40,6	44,7
234	28,7	41,3	40,8	44,4	274	31,5	40,9	42,9	48,3	314	35,2	38,5	39,2	46,5	354	35,0	41,0	40,6	50,4	394	32,2	43,4	43,6	48,0
235	32,9	42,2	42,5	46,1	275	29,8	43,4	43,5	50,0	315	29,7	39,3	38,5	49,0	355	34,9	43,0	41,5	46,1	395	27,4	34,8	35,5	44,2
236	33,1	42,2	41,8	46,2	276	25,3	34,7	36,1	41,7	316	35,5	46,6	47,3	55,0	356	30,9	34,3	34,8	41,1	396	28,7	35,8	36,3	39,9
237	36,0	44,6	43,7	48,4	277	33,1	41,2	40,9	44,8	317	30,3	40,8	41,4	47,4	357	35,1	40,3	40,9	45,6	397	23,6	36,2	37,2	41,3
238	33,3	41,7	40,8	44,7	278	27,7	40,9	42,2	46,1	318	34,9	43,4	42,3	49,2	358	35,3	45,4	45,9	52,1	398	28,6	40,2	41,0	44,5
239	36,3	42,4	42,0	45,9	279	34,9	43,4	44,6	48,0	319	40,8	47,9	48,4	50,6	359	26,2	37,8	37,8	45,2	399	24,5	36,7	36,0	39,9
240	32,3	38,0	38,4	41,2	280	33,7	46,0	45,9	50,8	320	30,8	40,9	40,4	45,2	360	26,1	38,1	36,4	45,1	400	23,2	28,5	28,0	32,6

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Tabela E.5. Continuação – Resultados de resistência à compressão aos 7, 28 e 63 dias do concreto traço A4. $f_{ck} = 40$ MPa, $w/c = 0,45$, produzido com CP V-ARI.

n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)				n.	Resistência à compressão (MPa)			
	7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias			7 dias	28 dias	63 dias	
401	28,6	37,2	35,9	40,2	441	32,3	40,5	40,9	44,6	481	34,2	40,2	40,9	45,2	521	32,2	37,2	37,3	44,0
402	29,5	35,0	36,0	39,9	442	32,3	42,2	43,1	46,7	482	30,4	37,3	36,4	42,5	522	32,4	48,5	49,1	53,4
403	34,5	39,5	40,0	43,6	443	32,2	39,4	40,0	43,2	483	28,7	38,4	39,7	46,8	523	44,9	53,8	55,0	60,4
404	37,5	40,2	39,9	47,6	444	28,1	34,3	34,9	37,8	484	31,2	41,7	42,3	46,6	524	32,4	44,4	45,3	50,1
405	35,0	42,4	41,7	45,8	445	31,7	39,9	40,0	44,4	485	44,8	49,7	50,6	52,2	525	41,7	51,2	52,3	56,6
406	29,4	39,3	39,7	42,4	446	37,3	44,6	43,4	49,0	486	55,2	60,8	62,0	64,0	526	36,1	50,2	52,1	57,7
407	28,4	36,5	35,5	41,0	447	34,8	42,2	43,0	46,3	487	38,7	45,5	49,2	53,4	527	35,5	53,4	54,3	59,8
408	29,5	41,0	40,2	44,4	448	29,9	44,8	43,7	49,0	488	37,8	47,9	47,1	52,9	528	48,4	61,1	62,7	68,0
409	37,9	52,9	53,8	58,5	449	21,3	26,6	26,0	29,6	489	34,6	42,0	39,4	52,7	529	37,0	50,5	51,5	57,0
410	32,3	38,8	37,7	40,7	450	37,5	43,4	44,6	50,1	490	31,9	40,6	40,7	45,2	530	46,0	57,5	58,5	63,2
411	32,3	43,5	44,6	48,4	451	33,2	39,7	39,2	45,2	491	30,0	36,3	36,8	42,9					
412	31,7	40,6	41,4	44,9	452	30,6	43,4	42,2	46,7	492	29,4	36,1	36,8	42,8					
413	26,0	28,9	28,4	32,5	453	39,0	46,4	45,8	51,5	493	36,0	44,7	41,5	49,1					
414	29,9	37,7	36,7	43,5	454	31,2	43,5	43,0	48,2	494	30,5	38,3	38,0	42,8					
415	30,2	35,4	36,0	41,4	455	27,5	36,5	37,9	41,3	495	28,2	43,6	44,6	50,1					
416	32,6	41,0	41,9	45,9	456	32,4	44,3	43,5	48,3	496	40,9	47,7	48,5	53,9					
417	27,8	41,0	39,8	45,8	457	29,9	40,8	40,0	45,2	497	31,9	40,4	41,7	46,6					
418	31,0	40,9	42,2	46,4	458	33,3	44,0	43,1	48,2	498	33,8	44,8	45,7	52,9					
419	30,3	40,8	41,2	45,7	459	26,2	36,0	36,8	40,2	499	29,4	44,8	45,7	52,9					
420	38,7	50,0	48,4	58,3	460	32,6	43,2	44,2	49,0	500	34,1	48,2	42,9	51,8					
421	35,0	40,7	42,2	45,2	461	33,9	44,7	45,8	49,2	501	32,6	45,3	45,6	52,0					
422	24,0	31,3	30,9	33,6	462	31,1	40,8	41,7	46,0	502	37,3	44,8	45,7	50,5					
423	28,2	36,2	35,7	40,6	463	34,2	43,2	44,1	47,7	503	37,5	48,0	49,0	55,5					
424	32,6	42,2	41,2	44,7	464	29,4	38,6	39,3	42,7	504	33,8	46,4	45,9	50,2					
425	47,0	57,1	58,2	60,7	465	36,0	44,5	45,4	49,0	505	31,8	44,1	44,0	49,2					
426	38,2	49,4	50,1	53,1	466	31,4	43,7	43,1	47,8	506	33,1	47,7	46,7	52,6					
427	33,7	43,1	43,5	46,1	467	38,2	46,6	46,4	51,8	507	32,6	46,6	47,3	51,4					
428	36,6	43,7	43,3	47,1	468	37,7	45,9	46,7	51,5	508	31,7	41,8	41,2	46,6					
429	37,9	45,9	46,6	49,8	469	43,0	52,4	53,3	59,0	509	29,2	45,2	44,0	50,3					
430	37,2	43,7	43,4	47,9	470	32,6	41,9	42,5	46,6	510	46,1	51,8	51,2	59,0					
431	28,5	40,4	40,8	44,1	471	31,7	37,9	36,8	41,2	511	36,0	41,0	41,0	46,6					
432	28,6	43,2	43,8	47,9	472	31,6	39,9	40,8	44,8	512	34,5	48,8	47,7	54,2					
433	31,2	42,8	42,1	47,2	473	33,4	40,7	41,4	46,0	513	38,2	45,1	44,7	51,2					
434	31,2	37,5	36,4	47,2	474	29,2	38,3	38,6	43,2	514	39,9	42,7	43,7	52,9					
435	29,2	46,5	45,4	52,3	475	31,1	40,5	-	44,2	515	29,3	41,4	40,8	46,3					
436	25,0	31,0	31,9	39,5	476	31,2	40,6	-	45,1	516	35,2	46,9	47,7	52,6					
437	23,0	35,6	36,0	41,3	477	29,5	39,7	39,9	44,9	517	33,2	41,7	41,2	50,0					
438	37,7	45,1	44,6	48,4	478	30,8	41,2	40,8	44,8	518	31,1	42,7	43,6	48,1					
439	33,8	43,1	43,4	47,1	479	34,8	44,1	43,3	53,2	519	35,5	47,7	47,2	53,8					
440	35,2	42,2	42,9	46,8	480	29,0	37,2	36,1	41,8	520	33,6	40,5	40,9	45,5					

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Anexo F

Obra B (2017 - 2019).

Informações e dados de resistência à compressão do concreto.

A Obra B foi realizada na cidade de Vitória, ES entre os meses de agosto de 2017 e janeiro de 2019. Os dados referentes a esta obra contemplam 712 resultados de resistência à compressão de concretos com classe de resistência de C30, C35 e C40, todos produzidos com cimento tipo CP III-40 RS e ensaiados aos 7 e 28 dias de idade.

Os traços das 3 diferentes famílias de concreto estão apresentados na Tabela F.1.

Tabela F.1 – Cartas de traço dos concretos em kg/m³.

Traço	f_{ck} [MPa]	tipo de cimento	w/c	Cimento (kg/m ³)	Areia fina (kg/m ³)	Areia média (kg/m ³)	Brita 0 (kg/m ³)	Brita 1 (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)
B1	30	CP III 40	0,51	430	426	426	874	-	220	4,00
B2	35	CP III 40	0,48	365	-	784	400	728	175	2,55
B3	40	CP III 40	0,46	420	-	752	1058	-	195	2,73

Fonte: acervo PhD Engenharia.

As Tabelas F.2, F.3 e F.4 apresentam os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade dos traços B1, B2 e B3, respectivamente.

Tabela F.2. – Resultados de resistência à compressão aos 3 e 28 dias do concreto traço B1, classe de resistência C30.

n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)	
	3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias
1	26,9	43,5	41	17,9	38,4												
2	25,7	39,7	42	17,2	36,0												
3	22,2	36,2	43	21,9	38,1												
4	24,2	37,0	44	20,6	33,7												
5	21,9	33,9	45	19,8	37,4												
6	23,4	36,0	46	25,2	34,4												
7	21,7	35,1															
8	20,7	34,4															
9	20,5	38,2															
10	20,6	33,9															
11	21,0	33,3															
12	21,4	32,2															
13	23,5	35,8															
14	22,0	38,8															
15	24,7	38,1															
16	23,7	33,9															
17	21,4	33,3															
18	20,9	37,0															
19	20,6	32,6															
20	21,4	32,4															
21	25,8	32,4															
22	25,5	32,2															
23	27,8	35,7															
24	20,6	30,9															
25	19,4	33,7															
26	19,4	31,1															
27	18,9	31,3															
28	18,6	36,6															
29	19,9	38,6															
30	21,9	33,7															
31	20,8	36,1															
32	19,2	35,2															
33	19,9	33,3															
34	20,1	35,4															
35	21,3	40,3															
36	19,6	33,9															
37	19,3	34,5															
38	20,5	35,7															
39	19,1	39,6															
40	18,7	40,2															

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Tabela F.3. Continua – Resultados de resistência à compressão aos 3 e 28 dias do concreto traço B2, classe de resistência C35.

n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)	
	3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias
1	25,9	38,5	41	27,2	36,9	81	28,6	41,2	121	27,8	38,1	161	31,7	40,7	201	28,3	39,0
2	22,3	35,5	42	29,3	36,6	82	28,7	37,3	122	30,0	37,4	162	31,3	40,0	202	27,6	37,4
3	25,3	36,6	43	30,5	43,0	83	30,3	40,2	123	32,2	40,7	163	29,8	38,8	203	26,5	38,6
4	26,6	37,7	44	31,2	39,0	84	28,5	37,4	124	30,9	40,7	164	31,7	42,3	204	28,8	40,6
5	26,0	36,9	45	30,6	42,2	85	30,7	41,9	125	29,7	36,8	165	28,6	38,7	205	26,6	41,2
6	26,4	37,4	46	30,5	39,2	86	31,3	42,6	126	31,2	39,5	166	28,5	38,0	206	25,9	38,7
7	30,8	49,6	47	30,2	39,5	87	30,2	36,9	127	32,6	41,2	167	29,5	39,2	207	29,1	39,5
8	27,6	36,3	48	29,4	39,4	88	30,6	42,5	128	30,1	38,8	168	27,1	36,9	208	30,4	39,0
9	31,7	40,4	49	29,9	39,1	89	29,4	38,9	129	29,3	38,7	169	28,9	36,9	209	29,0	39,7
10	21,9	43,6	50	28,2	37,7	90	30,0	41,3	130	29,0	37,9	170	27,3	36,7	210	30,6	38,7
11	25,6	37,0	51	27,4	36,2	91	30,2	41,0	131	30,2	39,1	171	29,2	37,5	211	21,4	41,1
12	24,3	37,6	52	27,7	38,3	92	26,6	39,9	132	30,6	39,6	172	29,3	38,8	212	19,5	44,0
13	26,7	41,2	53	25,9	36,8	93	29,4	38,8	133	31,5	38,6	173	28,5	38,7	213	21,0	43,9
14	24,7	35,6	54	28,1	38,8	94	28,5	40,6	134	30,1	39,3	174	29,5	41,6	214	22,8	49,5
15	26,3	50,1	55	24,7	38,6	95	27,6	41,3	135	32,9	39,7	175	26,4	39,8	215	22,8	42,2
16	24,8	37,9	56	23,7	36,4	96	26,1	40,0	136	31,2	41,5	176	28,4	40,1	216	20,9	40,0
17	25,2	38,3	57	26,1	37,8	97	27,5	37,6	137	31,0	39,3	177	29,3	39,1	217	22,3	42,7
18	25,5	36,8	58	25,7	36,2	98	25,2	36,9	138	32,2	39,8	178	28,7	37,8	218	23,1	38,3
19	25,9	39,5	59	24,4	36,9	99	33,6	37,8	139	30,7	38,3	179	30,6	41,6	219	20,3	49,6
20	25,6	36,8	60	25,0	37,0	100	32,4	40,7	140	29,5	40,1	180	30,3	40,6	220	24,7	41,4
21	23,7	40,5	61	27,2	38,4	101	31,7	39,0	141	30,3	39,3	181	30,4	40,8	221	19,5	42,4
22	24,3	36,4	62	25,0	37,3	102	31,3	41,4	142	32,0	39,6	182	30,9	39,1	222	23,3	43,0
23	24,7	36,9	63	24,9	36,3	103	31,0	39,1	143	29,3	38,9	183	30,6	40,5	223	24,0	41,3
24	24,0	36,5	64	24,7	40,8	104	34,9	37,5	144	31,6	43,2	184	30,4	41,4	224	24,6	38,9
25	25,5	37,2	65	26,9	40,5	105	33,3	39,8	145	33,5	42,3	185	27,7	42,3	225	24,2	39,9
26	23,0	37,8	66	26,1	36,4	106	31,2	36,6	146	29,7	39,0	186	28,4	41,4	226	25,5	49,1
27	26,0	44,7	67	25,7	36,3	107	32,2	36,3	147	29,1	36,9	187	28,0	38,8	227	25,7	39,7
28	27,5	38,3	68	27,5	38,7	108	33,2	39,2	148	29,3	39,5	188	29,2	41,7	228	24,9	37,2
29	27,9	37,4	69	26,8	41,8	109	34,9	39,3	149	28,5	41,6	189	29,3	40,7	229	23,5	38,7
30	25,6	47,2	70	28,9	40,6	110	29,0	41,2	150	27,9	40,6	190	27,3	40,7	230	26,6	40,5
31	25,6	38,9	71	25,6	40,3	111	28,8	41,3	151	28,4	43,2	191	27,9	39,4	231	26,0	44,8
32	28,8	38,3	72	27,7	41,1	112	32,6	42,0	152	28,6	38,9	192	27,1	43,4	232	26,2	49,6
33	27,2	36,8	73	29,5	38,6	113	26,1	38,2	153	28,4	44,6	193	28,8	41,0	233	27,2	46,4
34	23,6	38,2	74	28,7	39,4	114	28,2	38,4	154	30,7	38,2	194	27,9	38,7	234	24,8	43,5
35	25,2	37,5	75	29,6	41,0	115	28,5	38,5	155	32,2	40,8	195	28,3	39,7	235	25,5	46,0
36	30,9	40,0	76	32,4	40,6	116	29,1	37,6	156	30,6	43,8	196	26,8	41,1	236	26,3	37,9
37	28,9	38,3	77	30,3	37,5	117	28,1	38,5	157	29,4	41,5	197	30,3	43,2	237	26,9	49,0
38	29,0	37,7	78	29,5	36,9	118	27,0	38,5	158	29,9	42,8	198	30,0	41,5	238	29,9	51,4
39	29,4	36,8	79	37,5	46,3	119	26,8	38,1	159	30,6	41,9	199	30,0	43,3	239	23,2	39,4
40	27,6	36,9	80	29,8	42,0	120	27,3	36,6	160	29,5	43,7	200	27,7	40,7	240	23,4	47,2

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Tabela F.3. Continuação – Resultados de resistência à compressão aos 3 e 28 dias do concreto traço B2, classe de resistência C35.

n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)	
	3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias
241	23,5	42,6	281	31,1	39,0												
242	27,1	50,9															
243	27,3	40,2															
244	23,8	42,3															
245	25,3	46,6															
246	23,5	36,0															
247	25,0	41,8															
248	25,9	38,4															
249	24,7	40,7															
250	25,7	36,4															
251	23,8	36,2															
252	26,1	38,6															
253	25,2	45,8															
254	24,3	38,3															
255	25,1	42,6															
256	18,8	41,2															
257	26,6	39,6															
258	22,5	41,0															
259	20,9	40,7															
260	22,6	41,3															
261	22,9	43,9															
262	23,4	42,9															
263	25,5	42,5															
264	28,6	43,3															
265	30,5	48,9															
266	28,4	42,5															
267	29,3	40,3															
268	29,5	39,9															
269	31,5	42,3															
270	31,1	40,7															
271	32,4	45,2															
272	31,0	42,6															
273	30,2	48,7															
274	29,8	40,0															
275	33,4	39,5															
276	29,5	41,2															
277	28,1	38,6															
278	27,2	44,0															
279	28,0	39,9															
280	31,3	39,0															

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Tabela F.4 – Resultados de resistência à compressão aos 3 e 28 dias do concreto traço B3, classe de resistência C40.

n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)	
	3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias
1	29,7	44,7															
2	28,5	42,1															
3	29,3	44,3															
4	33,2	43,6															
5	34,4	44,6															
6	29,3	42,0															
7	29,8	45,1															
8	30,9	43,6															
9	32,1	41,6															
10	31,4	41,5															
11	32,3	42,0															
12	30,4	42,8															
13	30,3	42,4															
14	28,5	43,2															
15	30,0	44,0															
16	28,8	42,5															
17	30,1	44,1															
18	31,5	45,1															
19	32,3	43,3															
20	30,1	43,6															
21	31,3	44,2															
22	33,3	46,3															
23	33,4	45,2															
24	33,9	45,0															
25	29,5	44,4															
26	33,5	53,4															
27	32,3	44,6															
28	32,4	44,7															
29	33,1	43,9															

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Anexo G

Obra C (2018 - 2020).

Informações e dados de resistência à compressão do concreto.

Obra localizada na cidade de São Paulo, executada entre setembro de 2018 e fevereiro de 2020, ou seja durante 17 meses. Neste caso foram utilizados concretos de classe de resistência C30, C40 e C50, todos produzidos com cimento tipo CP II E-40, conforme traços apresentados na Tabela G.1.

Tabela G.1 – Cartas de traço dos concretos em kg/m³.

Traço	f_{ck} [MPa]	tipo de cimento	w/c	Cimento (kg/m ³)	Areia de quartzo (kg/m ³)	Areia artificial (kg/m ³)	Brita 0 (kg/m ³)	Brita 1 (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)
C1 *	30	CP II E 40	0,55	400						
C2	40	CP II E 40	0,45	394 **	524	429	449	449	177	1,9
C3	50	CP II E 40	0,40	443 **	502	411	452	452	177	1,3

(*) traço utilizado em elementos de fundação. Portanto, estima-se consumo de cimento de 400 kg/m³ e w/c = 0,55.

(**) 5% de sílica ativa

Fonte: acervo PhD Engenharia.

No total foram analisados 1.084 resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade. Registra-se que estes dados já foram objeto de análise prévia do autor desta dissertação, conforme registrado em artigo publicado no 65° Congresso Brasileiro do Concreto do IBRACON por Boni e Helene (2024)^a.

As Tabelas G.2, G.3 e G.4 apresentam os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade dos traços C1, C2 e C3, respectivamente.

^a BONI, Ricardo; HELENE, Paulo. Evolução da resistência à compressão do concreto segundo a ABNT NBR 6118:2023; fib Model Code 2020 e Eurocode 2: 2023. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 65., 2024, Maceió. Anais do 65 CBC. Maceió: Ibracon, 2024. p. 1-15.

Tabela G.2. – Resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias do concreto traço C1, classe de resistência C30.

n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias
1	28,0	33,2	41	20,6	32,4	81	21,3	32,3									
2	30,3	33,2	42	20,8	32,2	82	18,3	34,6									
3	28,1	35,1	43	29,1	33,7	83	18,0	30,9									
4	27,1	35,5	44	25,3	32,2	84	22,1	31,8									
5	27,9	33,6	45	25,4	33,7	85	16,9	24,0									
6	26,2	34,8	46	30,9	34,1	86	21,1	31,5									
7	26,4	33,3	47	29,8	32,6	87	20,2	30,7									
8	20,7	32,1	48	20,1	32,6	88	22,6	30,8									
9	23,3	32,1	49	18,0	31,8	89	24,9	31,3									
10	21,7	32,5	50	18,9	31,4	90	28,2	35,9									
11	24,5	31,2	51	21,9	33,1	91	24,9	34,2									
12	20,1	33,1	52	21,4	32,5	92	26,3	33,3									
13	21,4	31,9	53	19,3	32,1	93	20,1	36,8									
14	22,2	31,7	54	19,8	26,8	94	27,9	33,8									
15	21,8	33,8	55	17,2	25,3	95	24,9	32,7									
16	20,5	32,7	56	18,7	24,8	96	24,3	33,8									
17	19,1	32,3	57	19,0	28,0	97	23,9	32,9									
18	18,4	32,8	58	17,2	26,2	98	18,3	32,4									
19	18,0	33,6	59	18,7	26,4	99	18,0	33,7									
20	18,8	32,0	60	18,8	25,1	100	19,9	33,7									
21	25,0	32,2	61	18,9	26,0	101	20,0	34,0									
22	24,5	32,7	62	18,8	27,8	102	17,9	29,9									
23	24,5	32,9	63	18,5	27,1	103	20,6	33,9									
24	22,2	33,1	64	20,7	30,1	104	19,7	34,6									
25	23,8	33,0	65	20,8	30,5	105	15,9	27,2									
26	18,2	35,9	66	21,8	30,7	106	17,5	29,0									
27	21,5	36,5	67	21,3	30,2	107	23,0	31,3									
28	22,1	36,6	68	19,0	29,3												
29	17,8	36,9	69	17,9	21,1												
30	18,8	35,1	70	18,7	25,2												
31	17,9	31,1	71	20,1	31,7												
32	22,7	32,8	72	20,4	32,7												
33	20,1	31,3	73	21,4	31,6												
34	18,0	30,4	74	21,2	32,6												
35	20,6	32,2	75	22,0	31,6												
36	21,8	34,6	76	22,7	31,9												
37	21,0	34,1	77	18,1	31,4												
38	22,0	33,6	78	20,1	32,0												
39	22,0	31,8	79	18,8	31,6												
40	19,3	32,2	80	18,6	31,3												

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Tabela G.3. Continua – Resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias do concreto traço C2, classe de resistência C40.

n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias
1	37,7	46,3	41	39,7	49,2	81	30,2	46,2	121	31,4	42,9	161	27,6	43,5	201	28,1	51,6
2	37,4	47,8	42	40,4	49,4	82	32,0	46,1	122	32,0	46,1	162	26,6	42,2	202	28,3	50,5
3	35,3	46,7	43	40,1	49,8	83	32,0	48,2	123	31,6	45,8	163	27,9	42,4	203	27,9	51,1
4	37,7	58,2	44	40,3	51,8	84	33,4	48,2	124	31,6	45,5	164	28,4	42,1	204	28,2	48,7
5	38,3	53,6	45	40,3	50,9	85	31,7	43,9	125	34,9	46,7	165	28,7	41,6	205	27,5	50,4
6	37,2	47,0	46	39,2	51,2	86	32,7	42,0	126	32,7	44,9	166	28,3	42,4	206	26,4	40,7
7	36,3	46,5	47	42,5	49,2	87	32,0	42,9	127	27,4	41,4	167	28,6	44,7	207	38,7	45,0
8	36,8	47,8	48	39,7	48,4	88	31,5	42,6	128	29,0	42,6	168	27,0	44,0	208	38,2	44,1
9	35,7	50,2	49	41,4	48,9	89	28,4	42,4	129	27,2	42,7	169	25,4	42,9	209	37,5	44,0
10	37,5	48,5	50	39,7	48,6	90	30,5	42,4	130	28,0	41,1	170	23,6	44,4	210	36,4	43,4
11	36,1	47,0	51	37,6	45,9	91	31,6	45,9	131	27,8	42,7	171	25,5	43,9	211	39,3	43,5
12	37,7	49,5	52	38,4	47,9	92	32,7	42,8	132	29,5	41,6	172	26,7	43,9	212	37,9	42,9
13	36,9	51,9	53	38,4	46,0	93	30,0	42,9	133	28,1	42,7	173	26,1	43,6	213	36,1	44,4
14	36,7	50,1	54	39,5	46,9	94	35,2	44,9	134	30,1	43,1	174	26,0	44,9	214	38,6	42,1
15	37,2	45,8	55	37,2	46,9	95	33,7	43,8	135	31,3	42,1	175	27,0	43,6	215	35,5	44,0
16	37,1	50,7	56	37,9	46,2	96	29,2	42,4	136	30,9	43,2	176	27,0	43,9	216	31,7	45,9
17	38,2	49,3	57	36,8	47,9	97	32,3	42,9	137	30,8	44,0	177	25,6	42,5	217	32,3	45,4
18	37,2	48,7	58	34,8	45,7	98	32,1	43,3	138	29,8	42,4	178	27,0	42,9	218	29,6	46,9
19	37,1	48,8	59	34,4	45,8	99	31,8	43,7	139	31,2	42,1	179	27,8	42,2	219	29,2	41,9
20	42,9	54,5	60	33,4	44,1	100	30,6	42,7	140	30,9	45,5	180	25,5	43,7	220	25,5	42,5
21	42,8	54,4	61	33,8	45,3	101	34,2	42,3	141	32,7	43,6	181	32,1	43,3	221	24,8	42,0
22	40,9	47,4	62	36,1	43,9	102	33,0	43,9	142	29,4	43,5	182	29,5	42,0	222	27,2	42,3
23	41,1	50,2	63	34,4	45,0	103	34,4	42,2	143	30,5	43,2	183	30,9	45,1	223	26,4	45,4
24	42,9	49,7	64	42,7	46,3	104	34,2	44,2	144	29,2	42,9	184	32,3	41,7	224	28,3	42,3
25	41,3	51,3	65	34,8	40,7	105	30,6	48,5	145	30,9	42,5	185	32,6	41,2	225	26,4	40,6
26	41,8	52,2	66	36,0	44,4	106	27,1	42,3	146	27,4	43,7	186	35,5	45,2	226	29,0	44,3
27	46,4	53,8	67	36,6	44,8	107	30,0	42,9	147	28,6	44,6	187	31,3	43,5	227	28,0	42,3
28	42,5	51,3	68	34,5	44,9	108	33,1	43,1	148	28,7	43,6	188	35,3	43,4	228	30,0	43,7
29	43,7	51,8	69	37,0	42,7	109	33,4	42,8	149	26,1	44,3	189	34,1	42,6	229	27,1	54,6
30	44,3	51,9	70	32,5	43,9	110	34,8	44,5	150	28,0	44,5	190	34,7	44,9	230	25,8	47,7
31	44,7	49,4	71	30,1	42,7	111	33,7	43,0	151	28,5	43,9	191	32,7	45,5	231	27,6	52,0
32	41,2	51,7	72	31,8	44,6	112	35,5	45,9	152	29,0	45,6	192	30,8	50,9	232	32,0	45,6
33	40,0	49,9	73	28,0	44,9	113	33,9	43,9	153	30,4	42,4	193	28,1	49,2	233	34,0	42,9
34	41,9	50,1	74	28,9	43,5	114	34,5	46,0	154	30,7	44,4	194	29,9	52,3	234	30,0	41,7
35	40,0	49,5	75	26,2	42,2	115	32,5	44,2	155	28,2	43,3	195	26,1	51,4	235	27,0	44,6
36	40,1	51,0	76	27,5	46,3	116	33,3	43,3	156	30,4	44,4	196	26,9	49,4	236	28,3	41,8
37	39,2	50,9	77	40,0	46,0	117	32,7	43,8	157	29,4	45,1	197	26,7	51,0	237	35,6	44,6
38	40,3	51,1	78	37,5	45,9	118	34,3	44,9	158	29,3	42,7	198	27,0	53,4	238	33,5	44,2
39	41,1	49,2	79	38,0	46,6	119	34,9	43,7	159	31,0	42,9	199	28,5	49,0	239	46,4	52,4
40	41,8	52,0	80	30,1	49,9	120	34,5	45,4	160	31,1	44,1	200	28,7	49,2	240	47,5	51,3

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Tabela G.3. Continuação – Resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias do concreto traço C2, classe de resistência C40.

n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias
241	42,4	48,7	281	42,3	47,6												
242	38,5	46,2	282	39,6	43,7												
243	35,9	44,6	283	40,8	45,2												
244	33,1	42,3	284	34,6	42,5												
245	30,5	44,7	285	37,3	43,6												
246	28,9	44,1	286	30,4	46,3												
247	31,3	42,7	287	30,5	45,9												
248	26,6	42,7	288	30,4	45,2												
249	28,6	43,1	289	33,6	44,9												
250	29,1	45,9	290	29,2	43,6												
251	28,5	43,1	291	30,0	43,0												
252	31,6	45,2	292	34,7	45,8												
253	34,2	44,5	293	26,6	42,8												
254	31,5	43,8	294	26,9	43,8												
255	24,7	45,7	295	33,5	46,5												
256	34,2	42,7	296	32,3	41,7												
257	36,2	41,3	297	30,6	42,4												
258	34,7	41,3	298	32,8	42,6												
259	40,4	42,7	299	34,6	42,9												
260	27,5	41,6	300	34,4	44,7												
261	24,1	42,9	301	38,0	44,0												
262	27,7	41,3	302	29,4	43,2												
263	26,1	42,9	303	29,6	42,8												
264	27,8	42,7	304	30,6	44,1												
265	26,2	43,8	305	30,9	42,1												
266	28,8	45,7	306	29,9	44,8												
267	30,3	44,1	307	24,4	41,8												
268	30,0	44,3	308	25,9	42,6												
269	35,7	46,6	309	28,5	42,8												
270	35,1	43,8	310	37,9	44,2												
271	34,8	43,7	311	37,6	42,5												
272	33,5	41,8	312	38,3	41,7												
273	30,5	43,1	313	36,1	42,1												
274	30,4	44,6	314	35,9	43,3												
275	35,3	46,7															
276	33,3	45,3															
277	35,2	44,6															
278	30,4	46,4															
279	35,3	44,9															
280	32,4	45,5															

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Tabela G.4 – Resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias do concreto traço C3, classe de resistência C50.

n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias		7 dias	28 dias
1	49,1	54,7	41	77,5	85,0	81	32,6	54,9	121	46,7	63,2				201		
2	36,0	59,5	42	57,6	61,3	82	36,6	60,4									
3	36,2	56,1	43	56,2	62,3	83	40,2	65,1									
4	31,6	48,1	44	58,1	63,3	84	45,6	53,7									
5	31,6	48,1	45	59,7	67,2	85	53,1	58,7									
6	34,9	50,5	46	62,0	67,4	86	53,7	56,5									
7	35,7	55,6	47	40,9	59,1	87	49,1	52,4									
8	35,1	69,6	48	41,1	58,0	88	52,4	55,3									
9	38,7	55,7	49	50,7	68,3	89	45,5	50,9									
10	40,8	56,2	50	44,0	60,5	90	50,9	53,3									
11	36,8	61,8	51	44,4	59,1	91	34,3	57,8									
12	35,6	56,6	52	47,3	59,9	92	35,9	56,8									
13	31,5	59,2	53	47,1	56,9	93	42,7	54,9									
14	30,8	56,4	54	40,1	58,4	94	35,9	55,4									
15	31,3	53,9	55	54,6	57,9	95	52,4	54,3									
16	36,8	54,9	56	53,7	60,7	96	37,4	52,6									
17	37,4	51,3	57	61,8	65,5	97	47,0	54,9									
18	38,9	52,0	58	52,8	59,9	98	31,2	53,9									
19	39,8	52,4	59	41,9	55,6	99	37,4	52,4									
20	37,4	51,5	60	41,2	55,8	100	46,4	56,2									
21	36,4	54,3	61	42,0	61,5	101	45,9	52,9									
22	35,8	52,6	62	43,2	56,4	102	48,3	53,6									
23	35,5	53,3	63	42,8	62,6	103	48,1	50,4									
24	36,3	51,1	64	41,8	61,7	104	46,3	52,8									
25	32,2	69,8	65	45,4	61,4	105	46,9	52,0									
26	39,2	56,4	66	45,1	61,6	106	46,1	50,8									
27	41,7	55,6	67	51,8	63,0	107	45,8	56,8									
28	38,9	57,4	68	47,5	65,0	108	40,9	52,5									
29	41,5	55,5	69	49,7	61,3	109	40,8	53,3									
30	40,8	56,6	70	50,1	60,4	110	41,4	52,1									
31	42,9	58,4	71	49,8	65,8	111	38,5	54,0									
32	40,0	59,3	72	54,5	59,6	112	40,4	55,6									
33	40,9	58,6	73	51,9	60,5	113	41,0	55,2									
34	34,6	54,2	74	46,8	59,8	114	40,6	52,8									
35	33,5	55,2	75	32,0	51,7	115	49,5	63,4									
36	35,6	54,1	76	32,9	52,7	116	48,0	59,8									
37	39,6	51,4	77	32,7	55,3	117	48,6	62,8									
38	41,0	54,2	78	34,5	52,9	118	45,2	55,9									
39	41,6	54,3	79	33,8	53,5	119	47,9	57,8									
40	45,7	54,1	80	35,5	56,9	120	46,3	61,1									

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Anexo H

Obra D (2015 - 2016).

Informações e dados de resistência à compressão do microconcreto.

Trata-se de uma obra de reforço estrutural executada no Distrito Federal entre junho de 2015 e agosto de 2016. O produto utilizado foi um microconcreto industrializado, de base cimentícia, de elevado desempenho e alta resistência inicial, com classe de resistência C70.

No total foram analisados 556 resultados de resistência à compressão de corpos de prova ensaiados aos 3 e 28 dias de idade.

A Tabela H.1 apresenta os resultados obtidos analisados nesta dissertação.

Tabela H.1. Continua – Resultados de resistência à compressão aos 3 e 28 dias do microconcreto classe de resistência C70.

n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)	
	3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias
1	42,2	66,7	41	52,4	64,3	81	55,4	75,9	121	53,7	76,0	161	64,1	72,9	201	60,8	64,7
2	52,3	80,3	42	52,5	62,1	82	53,2	75,4	122	65,1	75,2	162	39,7	51,2	202	46,2	56,3
3	58,0	65,2	43	51,8	67,6	83	57,9	68,0	123	63,9	74,3	163	49,1	61,7	203	47,8	53,1
4	62,4	69,0	44	56,8	63,1	84	59,7	80,5	124	64,2	72,1	164	63,3	73,6	204	54,3	68,7
5	58,3	66,0	45	53,6	62,9	85	44,0	76,6	125	65,4	77,7	165	75,5	84,4	205	51,7	65,8
6	56,1	69,8	46	47,9	58,6	86	56,3	71,6	126	65,3	71,3	166	71,8	76,5	206	50,1	62,1
7	59,0	69,1	47	46,0	61,2	87	54,0	63,6	127	64,8	75,5	167	74,1	82,3	207	49,1	60,9
8	54,3	95,4	48	59,8	65,1	88	48,1	59,1	128	54,0	62,4	168	57,5	65,0	208	38,7	54,3
9	56,5	82,9	49	49,4	57,4	89	51,6	76,2	129	60,7	72,9	169	62,2	67,0	209	53,3	60,8
10	59,1	67,4	50	48,1	63,4	90	54,6	62,2	130	63,0	68,4	170	75,7	80,7	210	56,7	65,4
11	63,2	71,3	51	43,3	58,8	91	54,7	64,4	131	76,2	80,9	171	63,4	71,7	211	56,8	64,0
12	55,0	68,9	52	50,1	58,0	92	54,5	65,0	132	65,9	73,9	172	63,3	76,4	212	63,7	67,7
13	54,3	69,1	53	52,0	61,7	93	55,1	62,6	133	78,4	89,7	173	48,1	72,5	213	47,1	60,4
14	48,9	60,3	54	58,1	66,6	94	50,5	61,9	134	69,2	75,8	174	51,7	75,6	214	47,6	62,3
15	49,0	75,3	55	54,6	85,3	95	50,7	60,2	135	64,4	67,6	175	51,8	74,6	215	58,3	65,4
16	51,8	79,5	56	56,4	71,4	96	53,3	75,0	136	79,2	84,8	176	53,6	80,1	216	42,7	64,2
17	46,8	53,8	57	60,1	75,3	97	50,5	59,0	137	70,8	77,8	177	53,3	81,2	217	60,1	64,9
18	47,4	63,2	58	55,9	76,7	98	68,9	75,1	138	78,5	86,2	178	49,2	74,6	218	63,0	69,9
19	51,6	69,9	59	65,3	79,2	99	41,0	56,5	139	80,0	88,9	179	59,6	72,5	219	54,8	62,8
20	50,0	68,4	60	53,2	84,8	100	48,5	62,3	140	61,0	68,7	180	63,2	70,3	220	59,6	67,2
21	47,1	69,6	61	60,7	87,7	101	64,8	92,1	141	60,0	72,2	181	59,4	71,5	221	53,5	65,3
22	56,9	81,0	62	51,5	65,1	102	58,0	67,9	142	63,5	70,8	182	46,2	76,7	222	58,7	72,9
23	57,4	82,7	63	50,1	75,7	103	58,3	76,8	143	62,0	70,9	183	56,5	78,1	223	56,0	74,5
24	62,0	76,5	64	54,0	67,8	104	52,3	92,0	144	61,9	68,8	184	66,6	70,4	224	59,6	77,0
25	55,0	68,8	65	65,5	74,1	105	55,5	59,3	145	62,6	69,3	185	59,3	68,0	225	62,1	77,7
26	53,7	79,7	66	63,6	76,3	106	55,5	72,3	146	66,3	74,8	186	58,5	70,7	226	59,7	63,8
27	54,9	70,6	67	51,8	66,6	107	59,1	89,1	147	70,8	82,2	187	59,0	64,1	227	60,9	68,0
28	57,5	62,4	68	70,4	76,8	108	62,7	77,0	148	64,3	77,0	188	61,8	70,1	228	58,8	68,7
29	56,4	70,2	69	54,5	63,1	109	56,4	79,2	149	67,7	78,3	189	63,3	72,4	229	60,7	69,3
30	57,7	62,4	70	51,4	76,9	110	59,0	84,1	150	66,3	76,8	190	63,0	68,7	230	64,0	74,5
31	64,6	69,8	71	64,7	73,2	111	61,7	72,4	151	72,2	81,8	191	62,6	63,1	231	63,4	71,2
32	59,3	66,7	72	50,6	57,1	112	51,8	74,6	152	65,8	79,2	192	63,7	72,1	232	57,8	82,8
33	60,5	68,9	73	55,7	65,1	113	58,3	72,8	153	78,9	83,0	193	61,2	62,3	233	59,3	81,6
34	64,5	70,4	74	59,8	65,0	114	55,7	63,5	154	82,6	89,0	194	59,2	65,2	234	56,3	63,8
35	66,7	71,3	75	62,8	76,9	115	73,7	81,6	155	68,7	81,5	195	59,4	65,6	235	50,6	71,2
36	57,9	68,8	76	49,0	67,3	116	63,2	73,5	156	77,9	88,1	196	66,9	71,8	236	49,1	71,0
37	56,2	67,7	77	54,5	62,3	117	54,4	62,9	157	75,5	85,3	197	66,7	71,0	237	52,3	68,9
38	57,4	67,0	78	53,3	76,2	118	67,7	77,6	158	68,2	80,0	198	57,5	63,1	238	51,2	63,3
39	52,9	63,5	79	66,0	76,4	119	76,6	85,4	159	72,7	81,5	199	74,2	79,7	239	53,7	66,4
40	49,2	61,8	80	57,7	87,8	120	55,8	68,8	160	63,9	74,4	200	48,4	59,8	240	49,0	71,6

Fonte: acervo PhD Engenharia.

Tabela H.1. Continuação – Resultados de resistência à compressão aos 3 e 28 dias do microconcreto classe de resistência C70.

n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)		n.	Resistência à compressão (MPa)	
	3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias		3 dias	28 dias
241	46,7	60,9															
242	50,9	67,2															
243	68,1	71,5															
244	62,8	78,3															
245	54,9	65,9															
246	60,9	69,6															
247	53,4	66,8															
248	62,7	72,3															
249	70,5	74,2															
250	69,3	72,4															
251	71,7	78,5															
252	52,7	69,1															
253	44,8	62,7															
254	50,4	65,6															
255	58,2	61,8															
256	51,6	68,3															
257	46,2	64,3															
258	55,9	70,4															
259	41,1	67,1															
260	52,7	72,4															
261	50,9	58,3															
262	45,7	56,7															
263	53,1	59,4															
264	54,6	66,6															
265	53,1	66,4															
266	59,1	62,2															
267	45,2	63,3															
268	55,2	71,7															
269	52,0	70,5															
270	51,5	70,4															
271	53,6	65,9															
272	58,2	67,3															
273	52,6	65,1															
274	51,3	65,1															
275	46,1	53,8															
276	57,5	63,9															
277	50,1	60,5															
278	50,5	56,8															

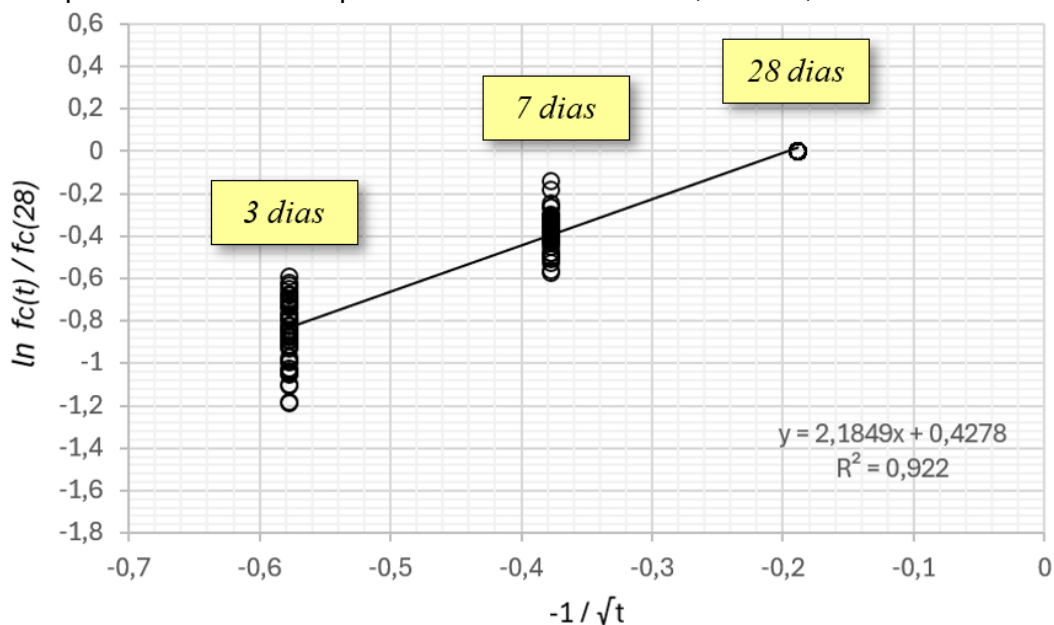
Fonte: acervo PhD Engenharia.

Anexo I

Amaral Filho (1945).

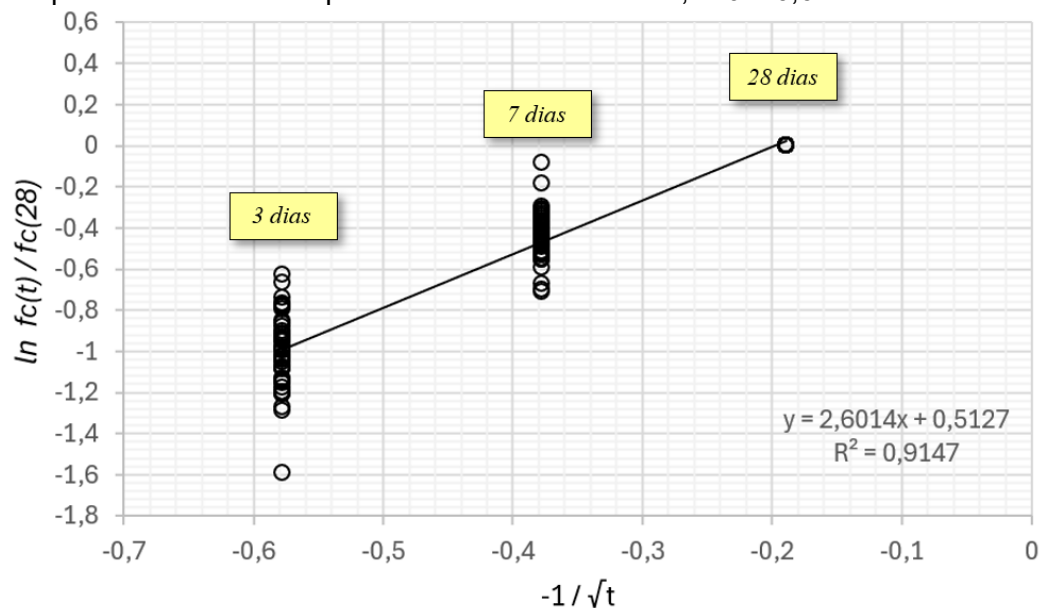
Representação linear das curvas de crescimento da resistência à compressão do concreto.

Figura I.1 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão do concreto produzido com o cimento A, $w/c = 0,5$.



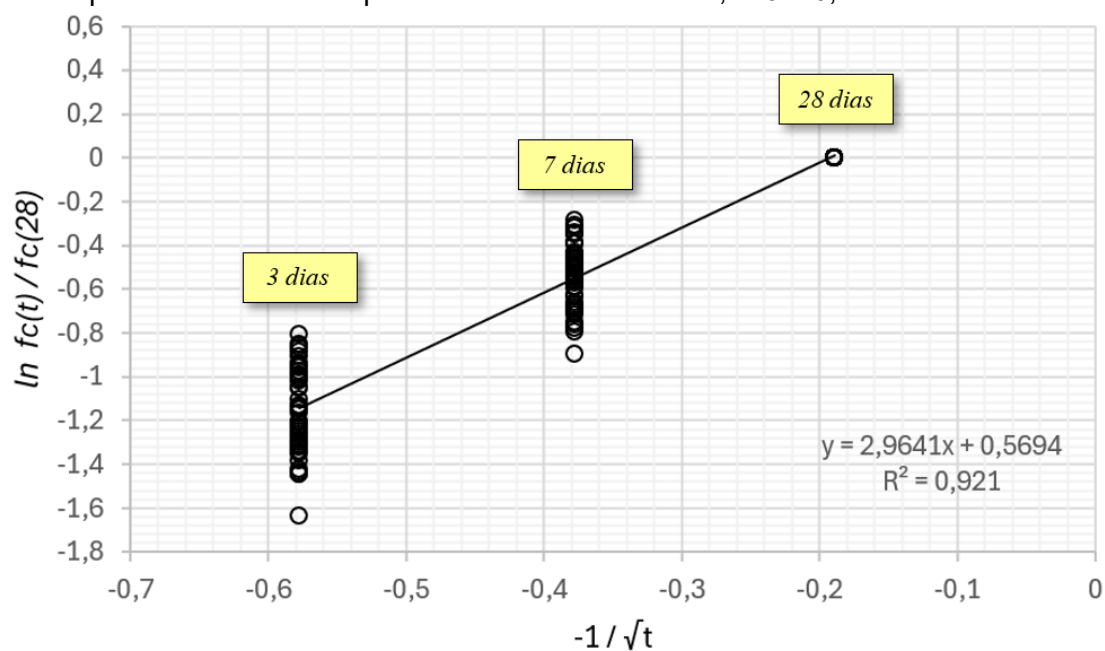
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados históricos de Amaral Filho (1945).

Figura I.2 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão do concreto produzido com o cimento A, $w/c = 0,6$.



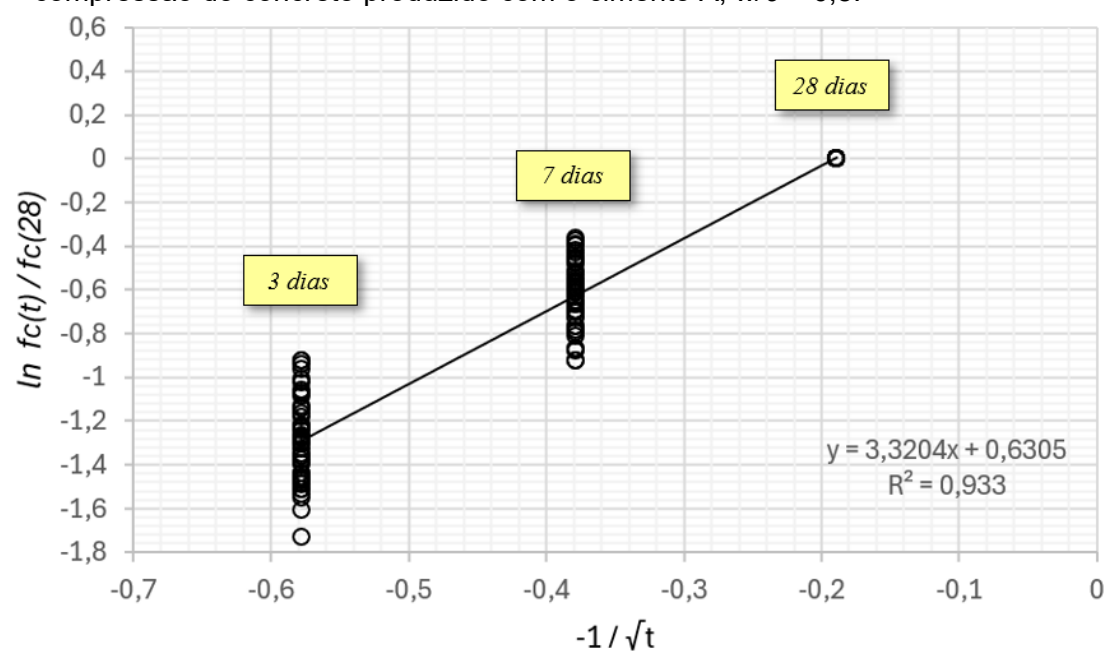
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados históricos de Amaral Filho (1945).

Figura I.3 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão do concreto produzido com o cimento A, $w/c = 0,7$.



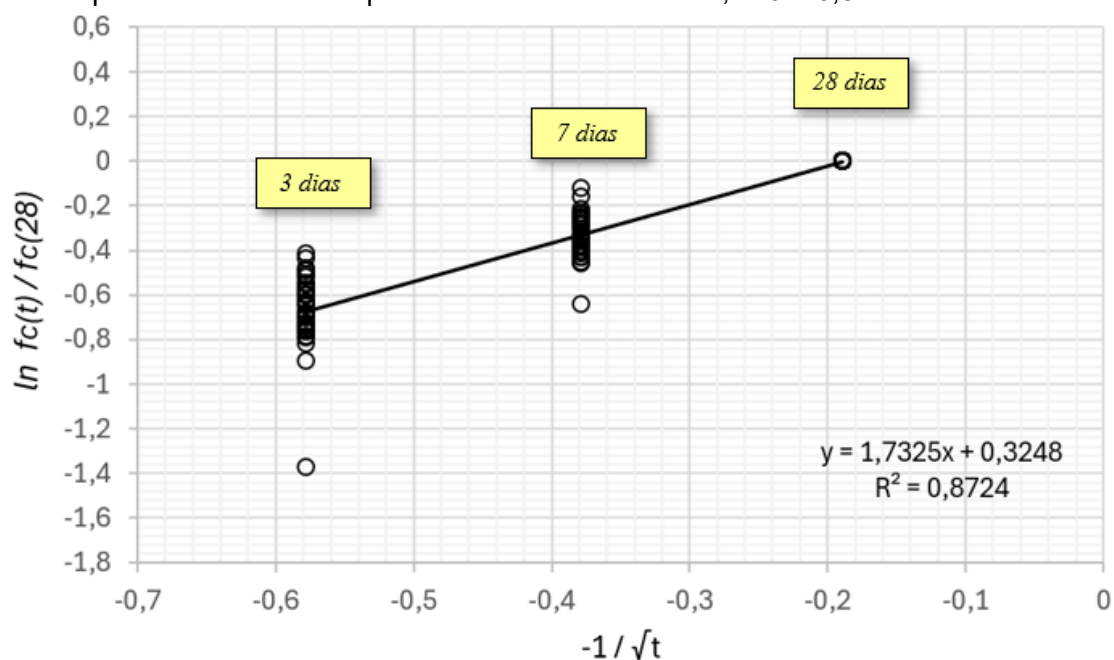
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados históricos de Amaral Filho (1945).

Figura I.4 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão do concreto produzido com o cimento A, $w/c = 0,8$.



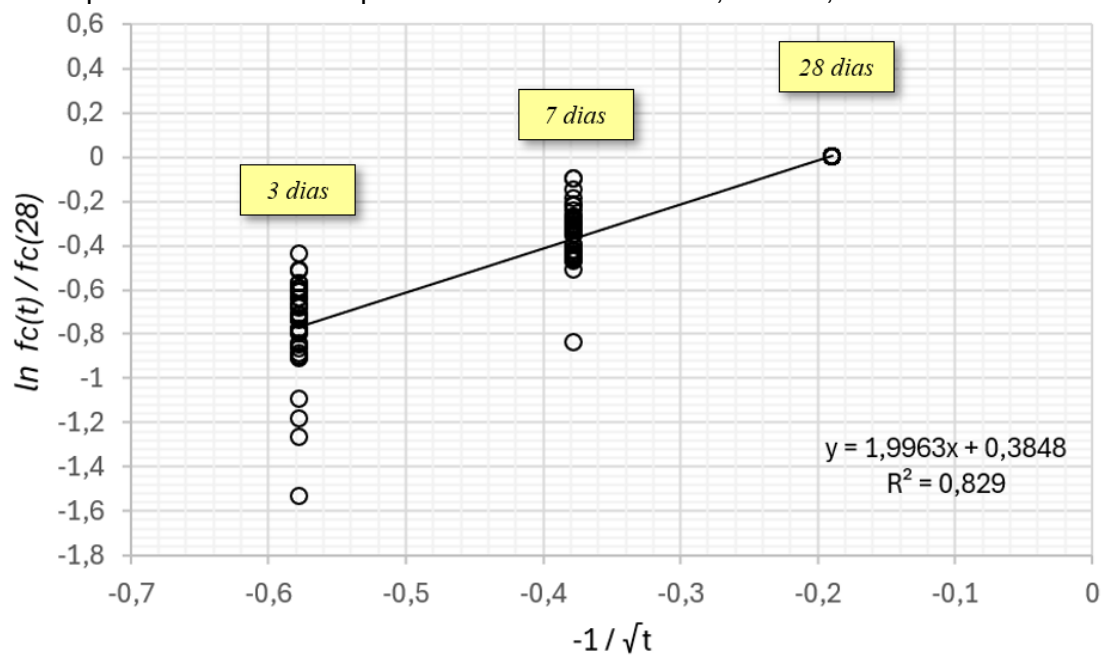
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados históricos de Amaral Filho (1945).

Figura I.5 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão do concreto produzido com o cimento S, $w/c = 0,5$.



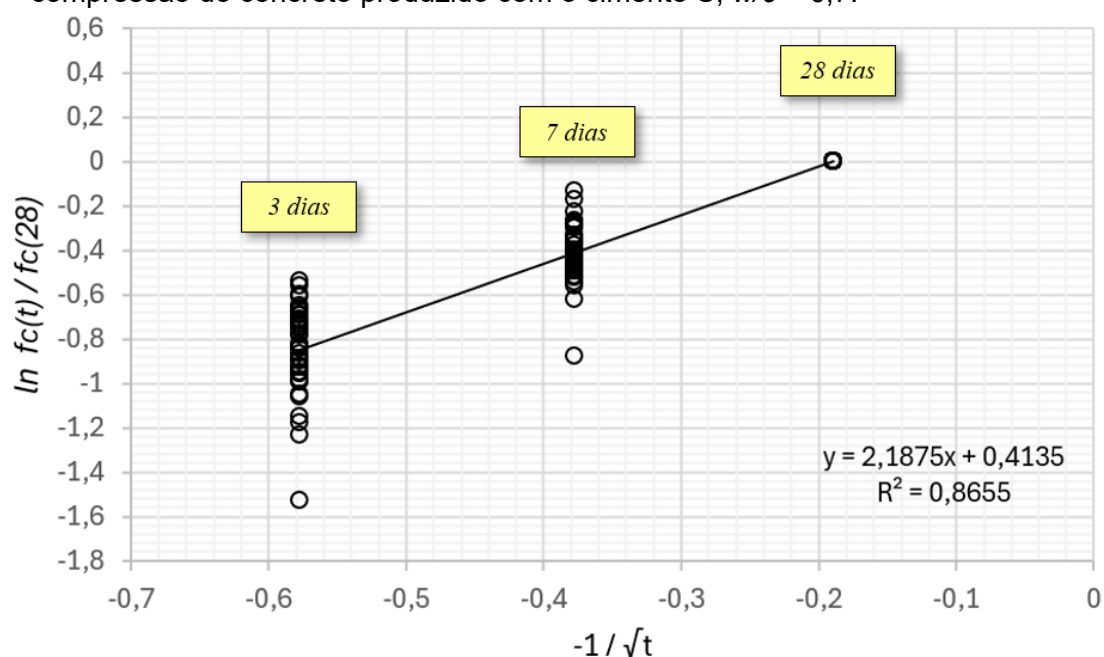
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados históricos de Amaral Filho (1945).

Figura I.6 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão do concreto produzido com o cimento S, $w/c = 0,6$.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados históricos de Amaral Filho (1945).

Figura I.7 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão do concreto produzido com o cimento S, $w/c = 0,7$.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados históricos de Amaral Filho (1945).

Figura I.8 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão do concreto produzido com o cimento S, $w/c = 0,8$.

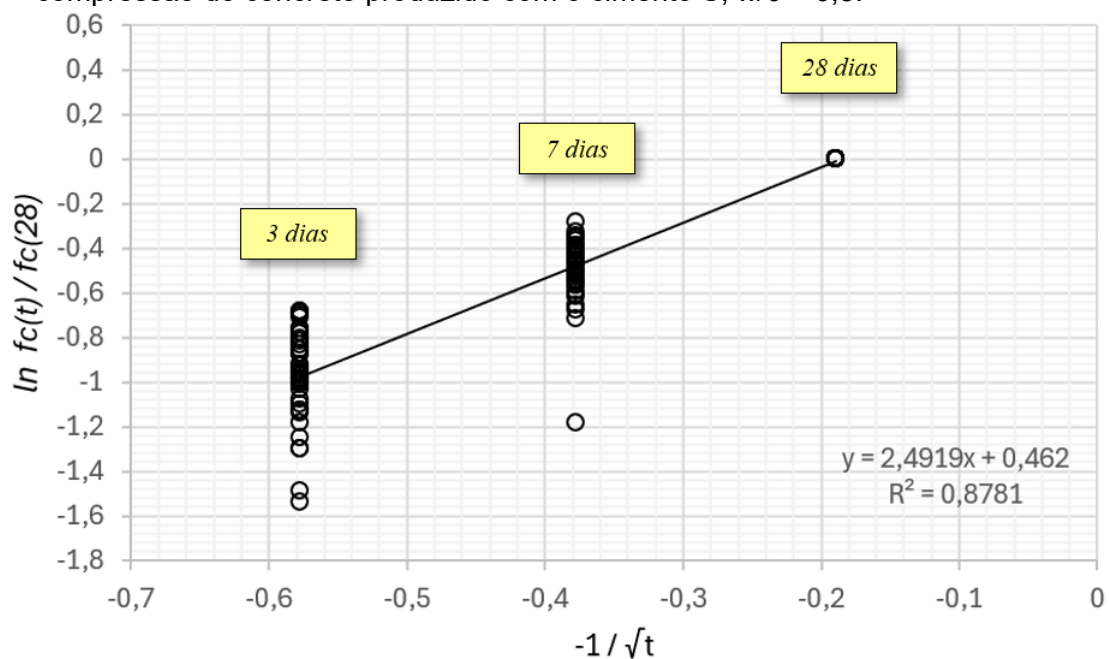
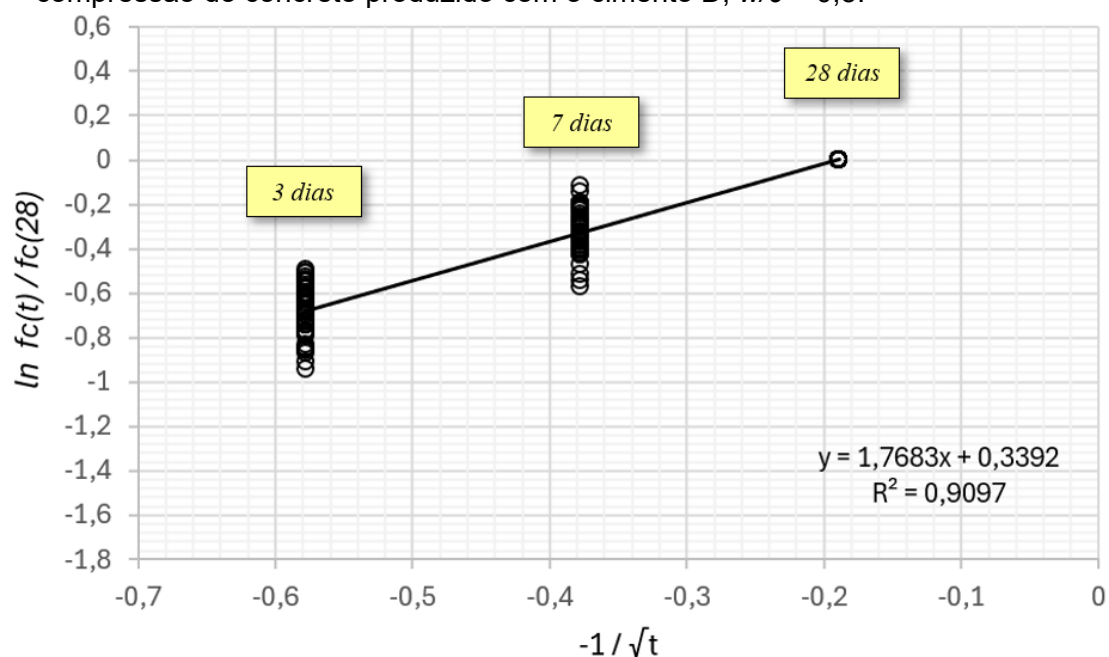
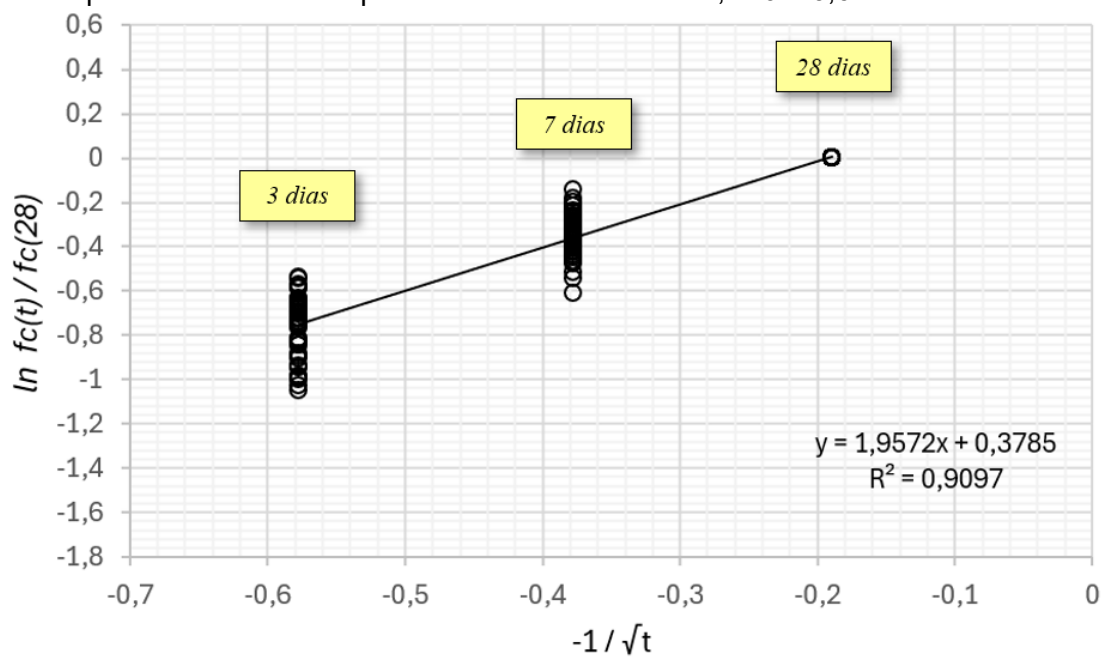


Figura I.9 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão do concreto produzido com o cimento D, $w/c = 0,5$.



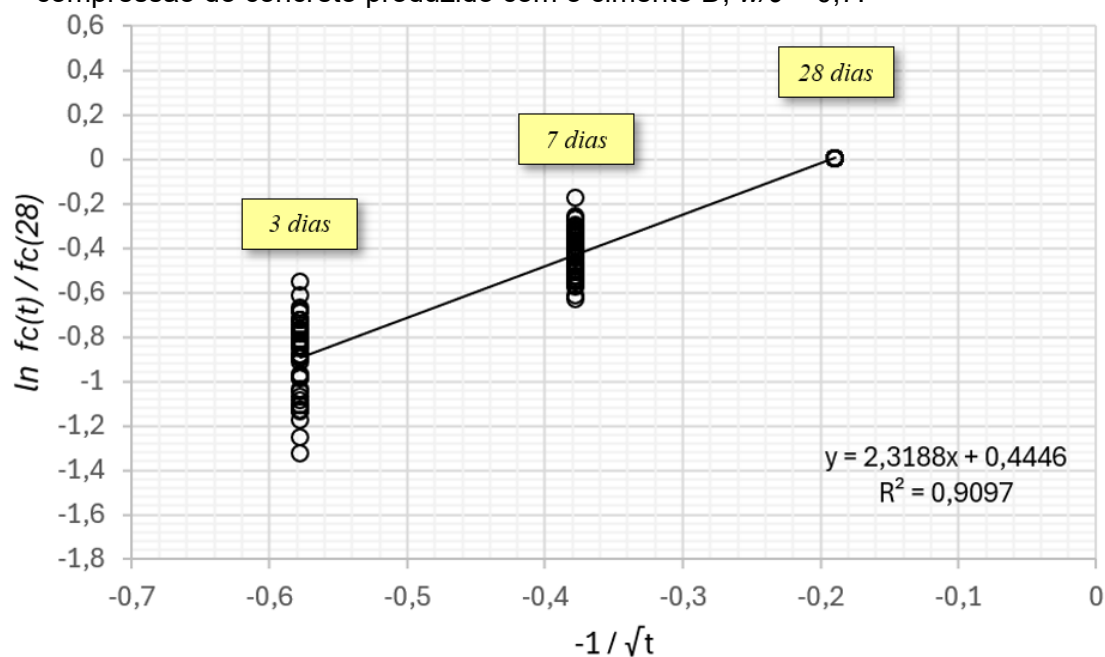
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados históricos de Amaral Filho (1945).

Figura I.10 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão do concreto produzido com o cimento D, $w/c = 0,6$.



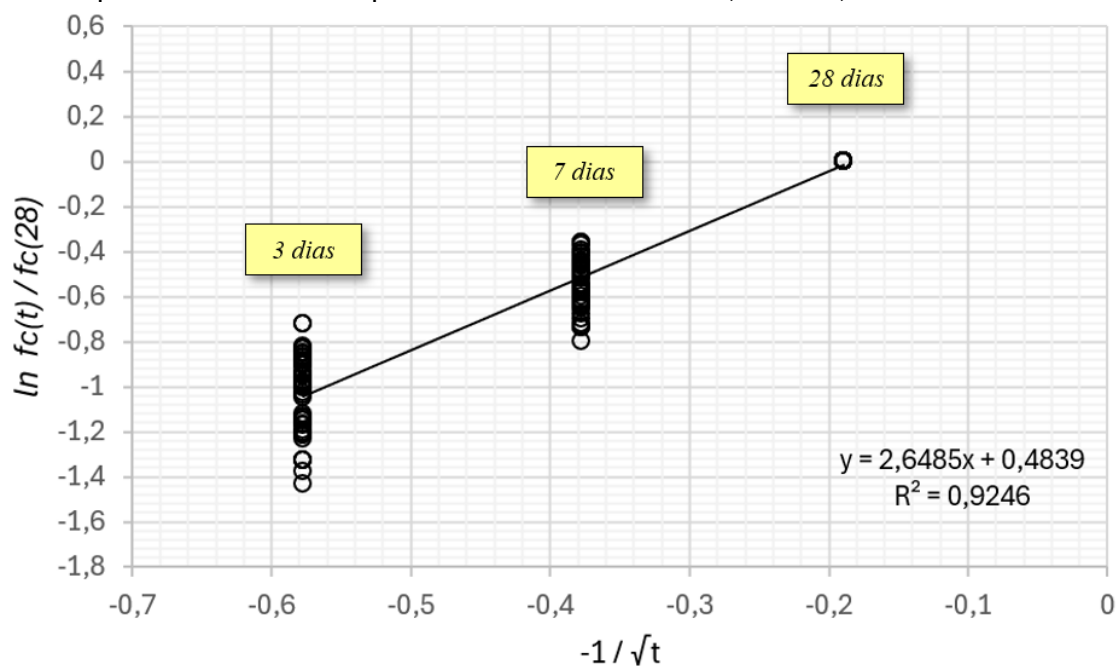
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados históricos de Amaral Filho (1945).

Figura I.11 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão do concreto produzido com o cimento D, $w/c = 0,7$.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados históricos de Amaral Filho (1945).

Figura I.12 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão do concreto produzido com o cimento D, $w/c = 0,8$.



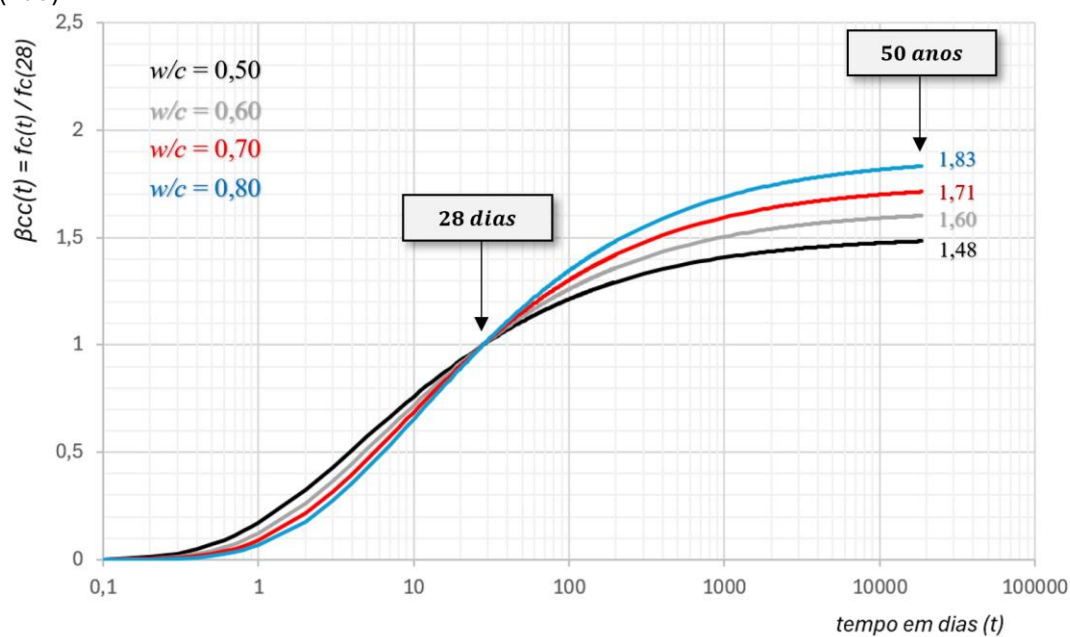
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em dados históricos de Amaral Filho (1945).

Anexo J

Amaral Filho (1945).

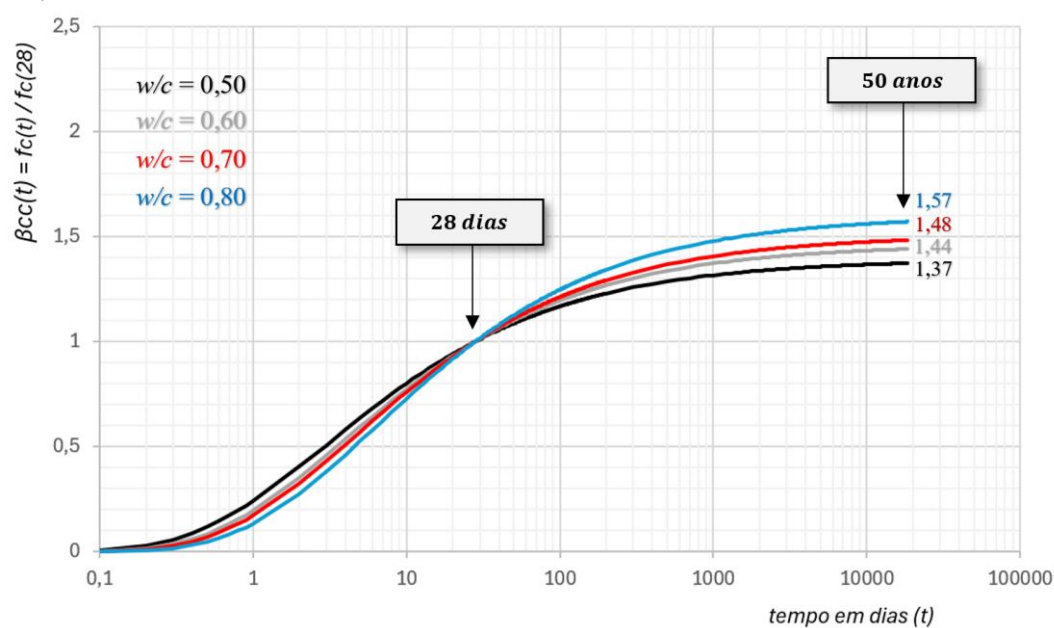
Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto.

Figura J.1 – Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de concretos produzidos com cimento tipo CP I – Fábrica A, para diferentes relações água/cimento (w/c).



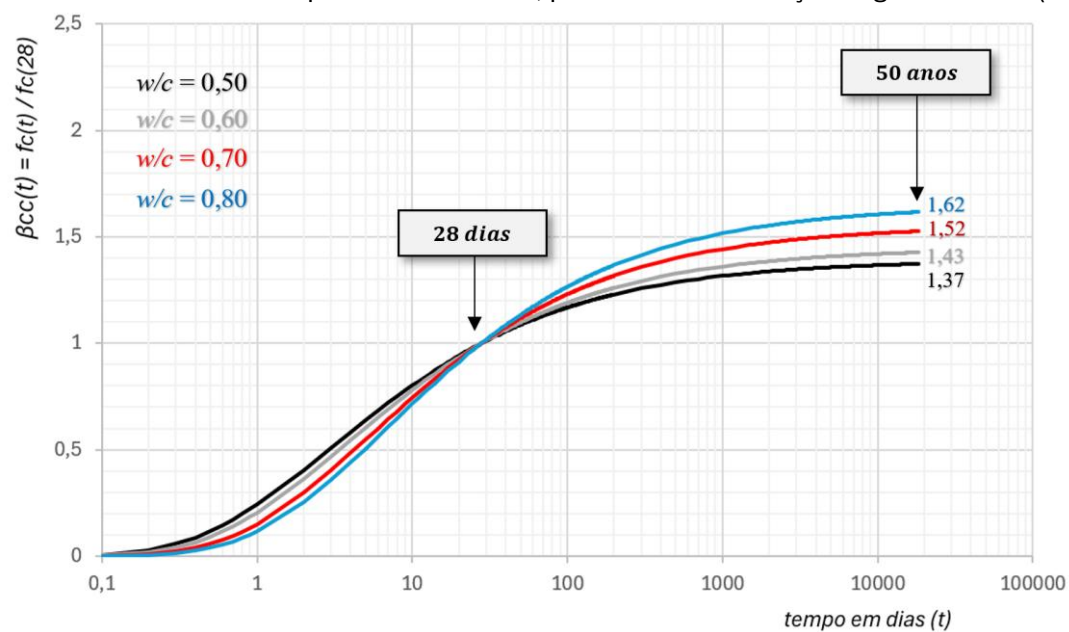
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Amaral Filho (1945).

Figura J.2 – Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de concretos produzidos com cimento tipo CP I – Fábrica S, para diferentes relações água/cimento (w/c).



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Amaral Filho (1945).

Figura J.3 – Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de concretos produzidos com cimento tipo CP I – Fábrica D, para diferentes relações água/cimento (w/c).



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Amaral Filho (1945).

Anexo K

Tango (1983).

Representação linear das curvas de crescimento da resistência à compressão do concreto.

Figura K.1 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1957.

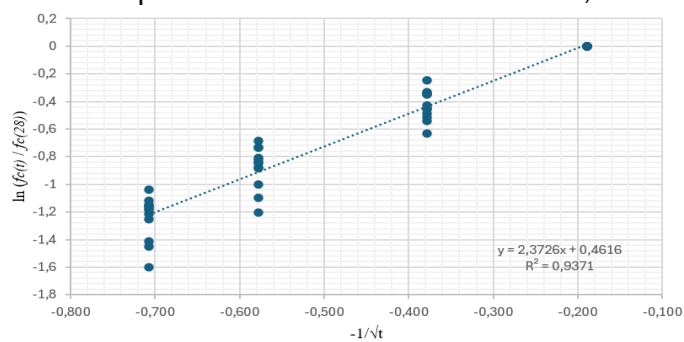


Figura K.2 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1957.

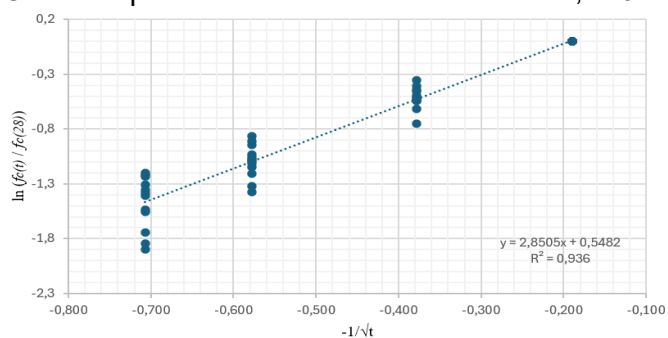


Figura K.3 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1957.

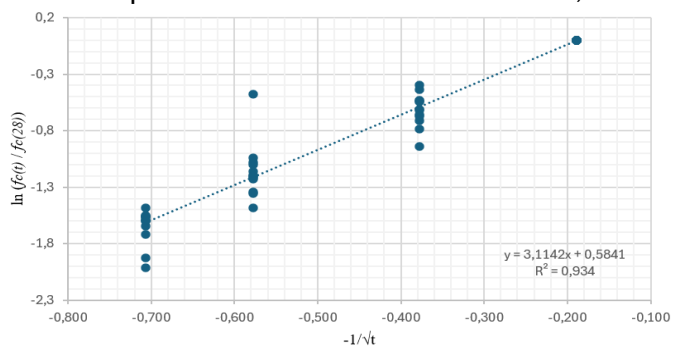


Figura K.4 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1957.

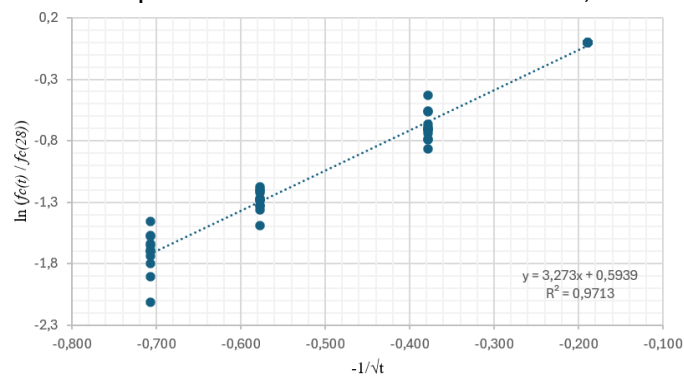


Figura K.5 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1957.

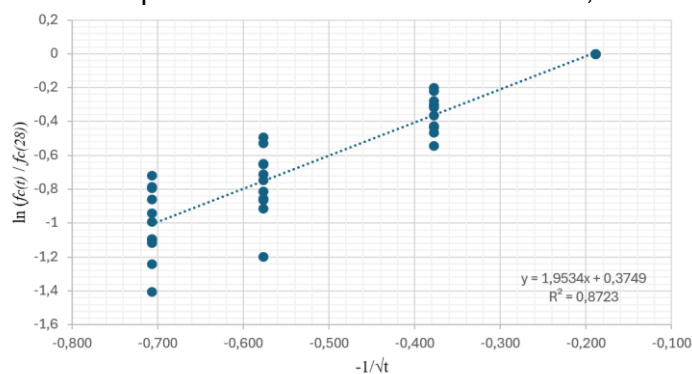


Figura K.6 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1957.

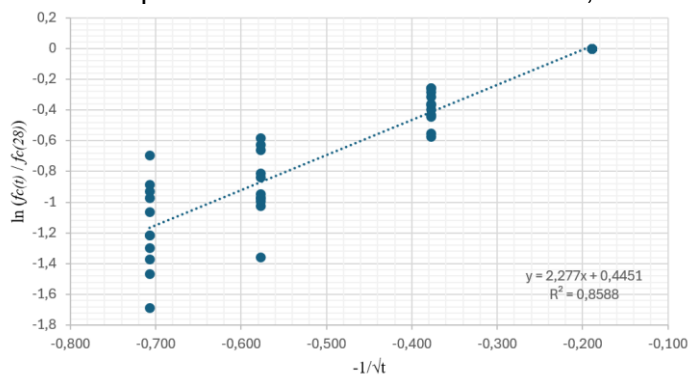


Figura K.7 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1957.

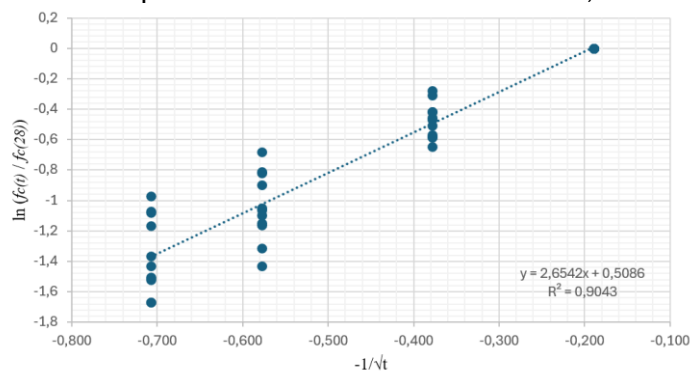


Figura K.8 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1957.

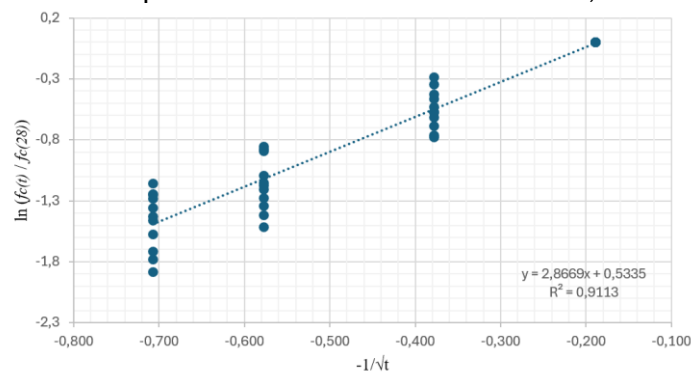


Figura K.9 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1957.

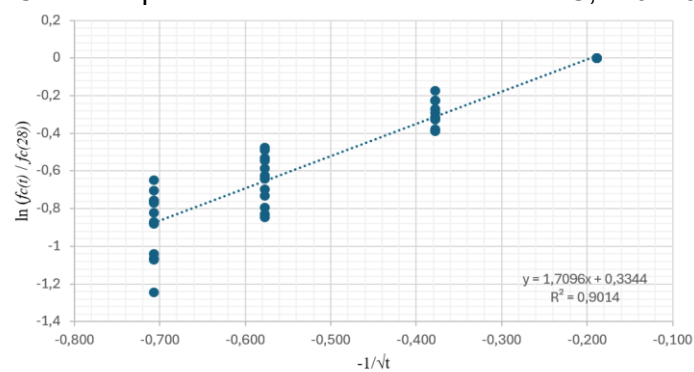


Figura K.10 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1957.

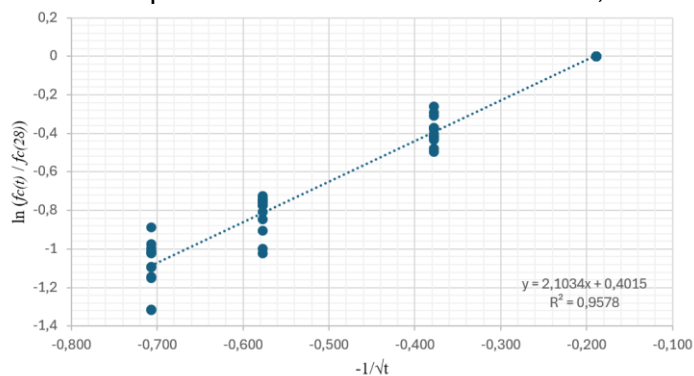


Figura K.11 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1957.

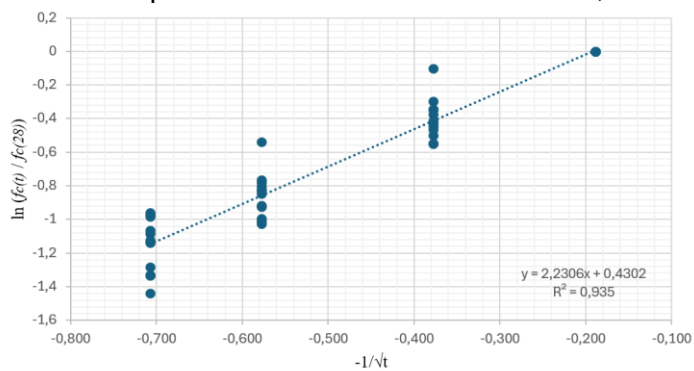


Figura K.12 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1957.

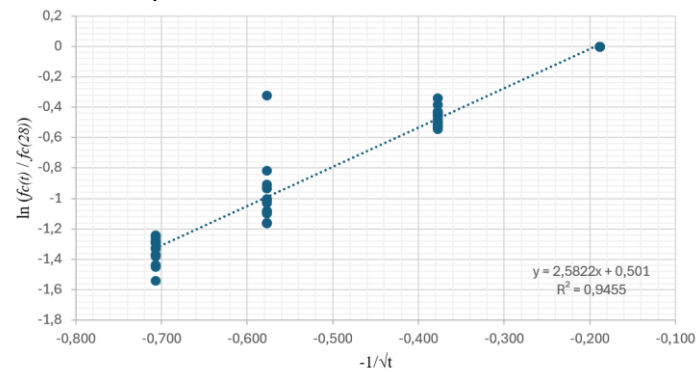


Figura K.13 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1958.

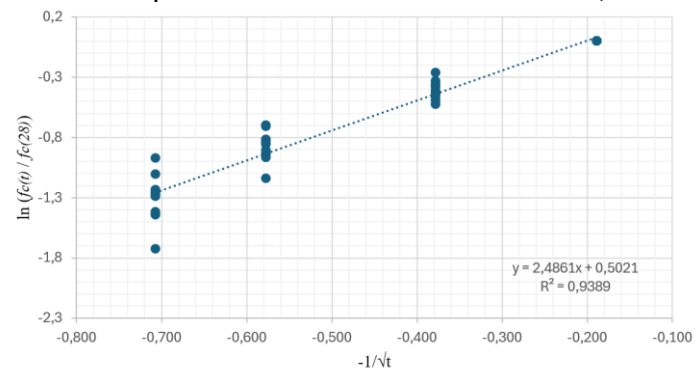


Figura K.14 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1958.

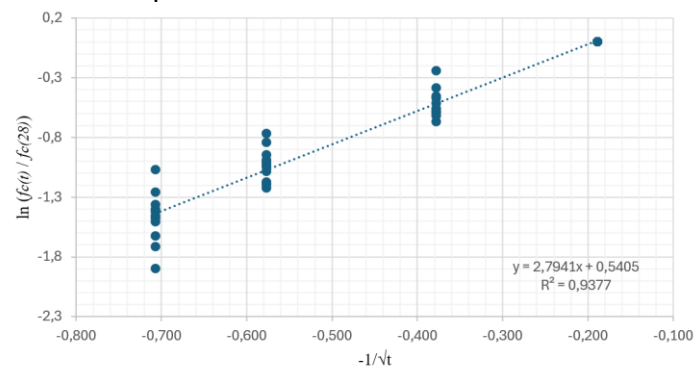


Figura K.15 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1958.

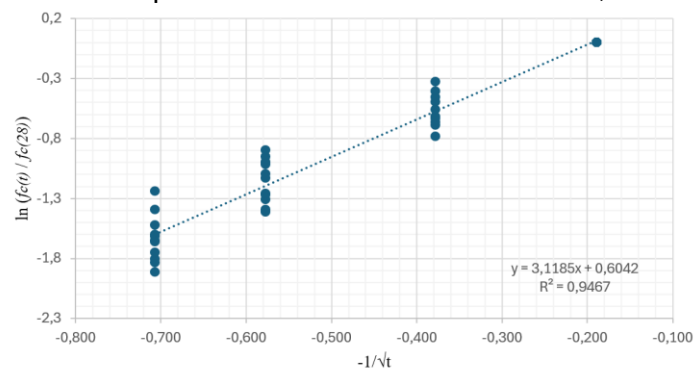


Figura K.16 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1958.

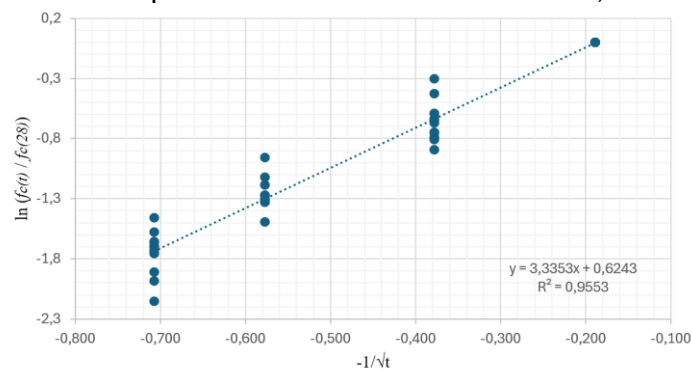


Figura K.17 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1958.

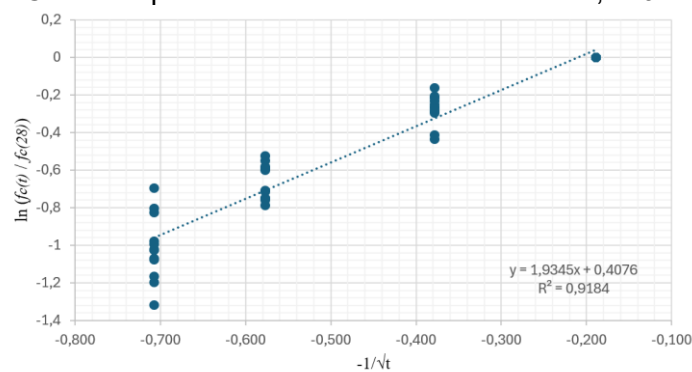


Figura K.18 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1958.

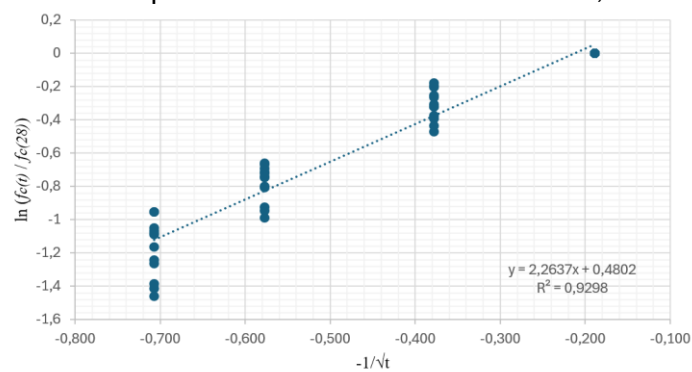


Figura K.19 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1958.

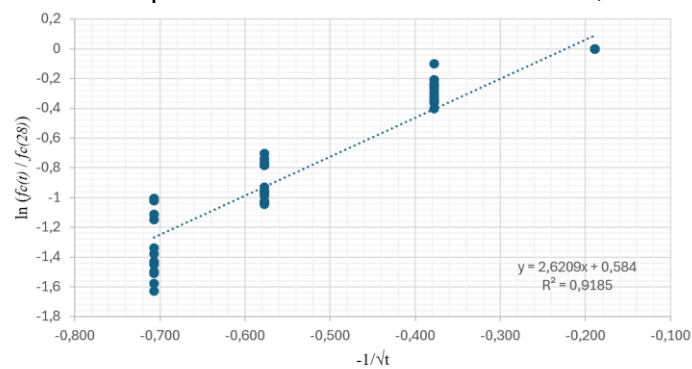


Figura K.20 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1958.

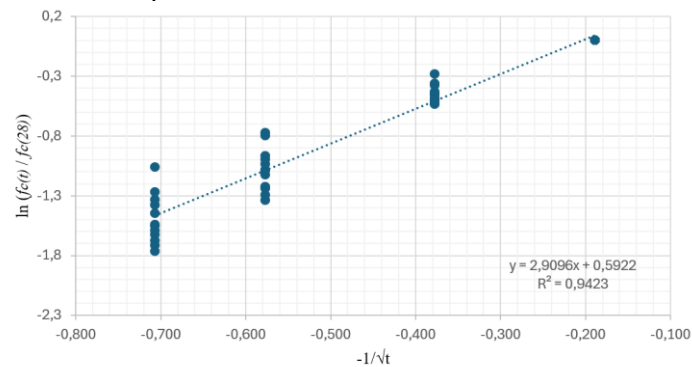


Figura K.21 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1958.

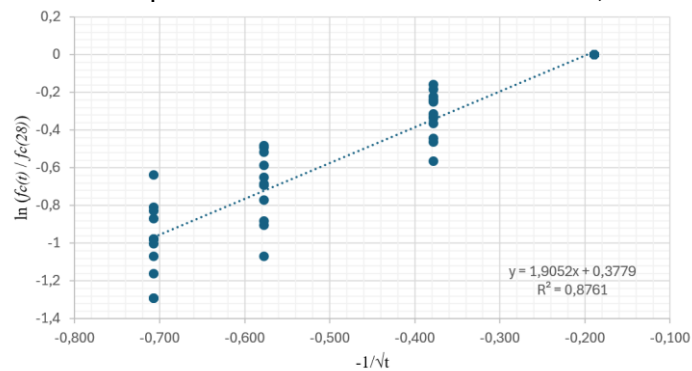


Figura K.22 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1958.

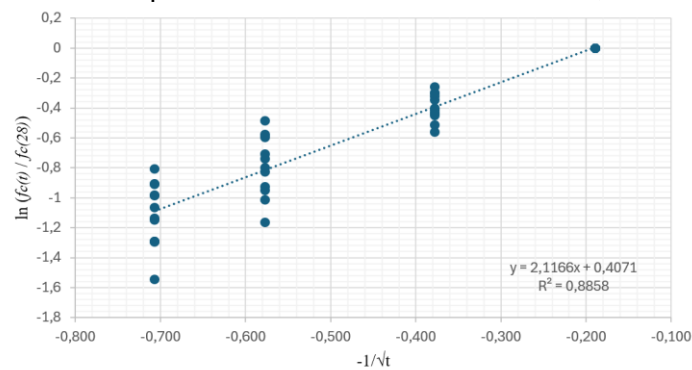


Figura K.23 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1958.

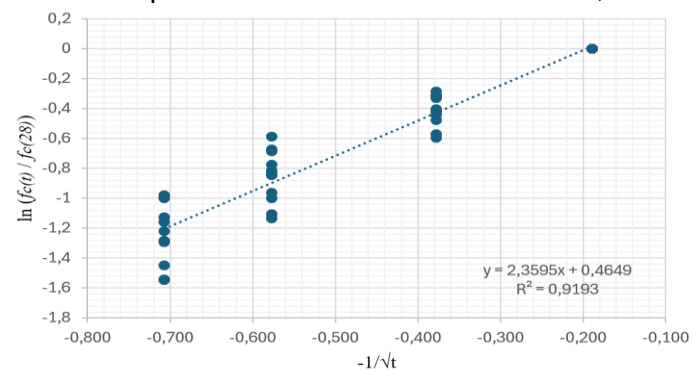


Figura K.24 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1958.

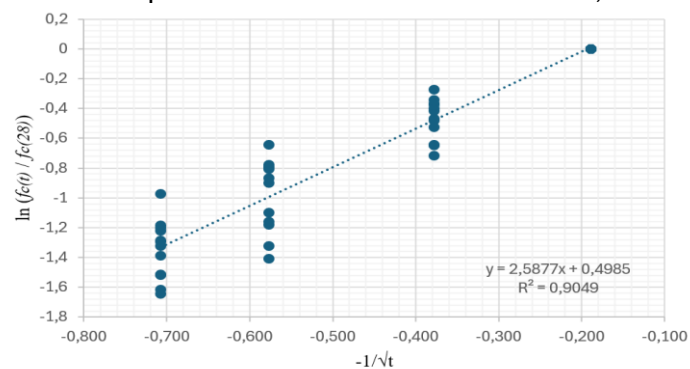


Figura K.25 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1959.

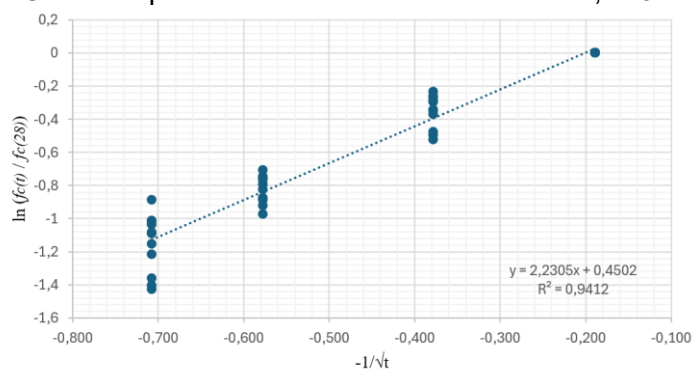


Figura K.26 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1959.

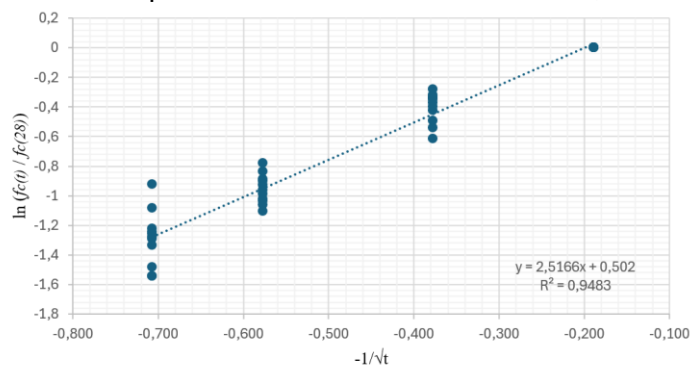


Figura K.27 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1959.

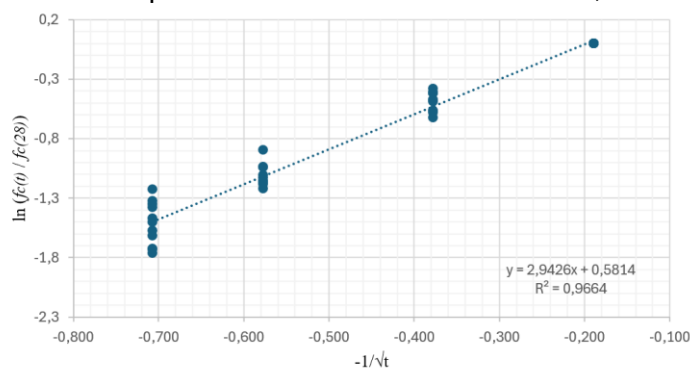


Figura K.28 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1959.

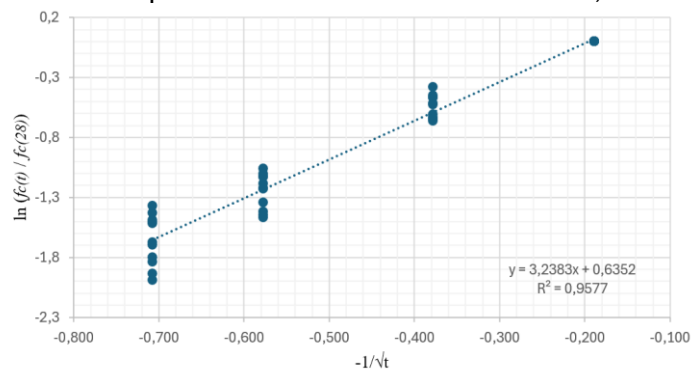


Figura K.29 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1959.

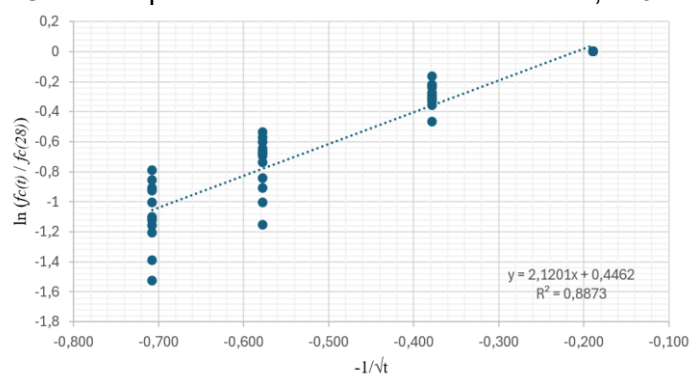


Figura K.30 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1959.

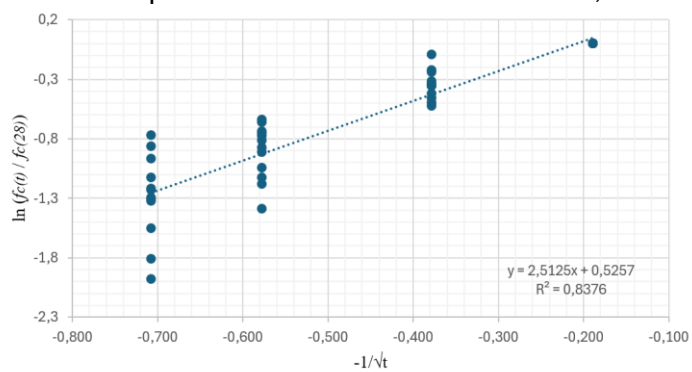


Figura K.31 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1959.

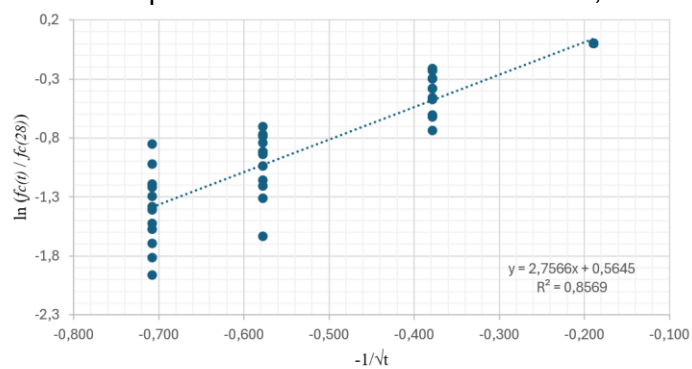


Figura K.32 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1959.

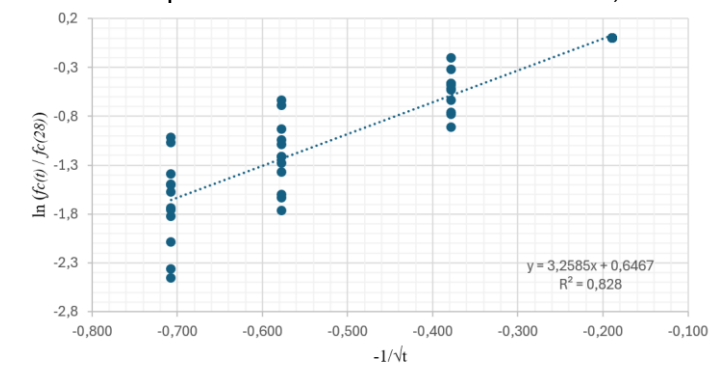


Figura K.33 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1959.

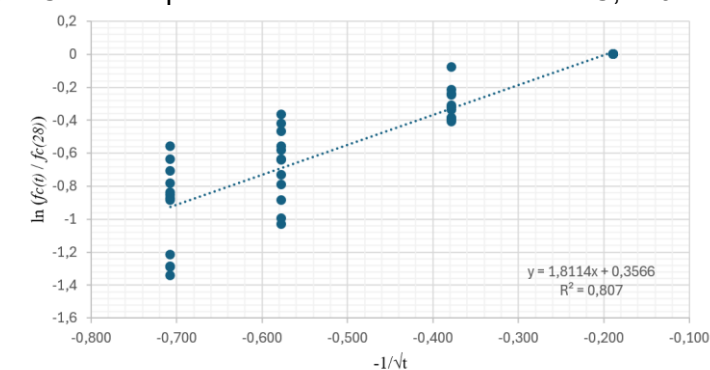


Figura K.34 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1959.

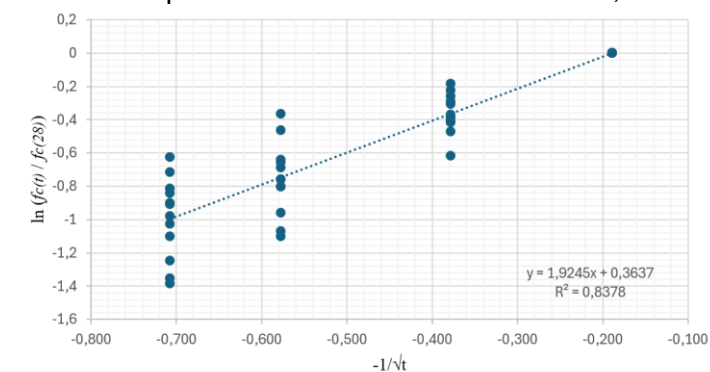


Figura K.35 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1959.

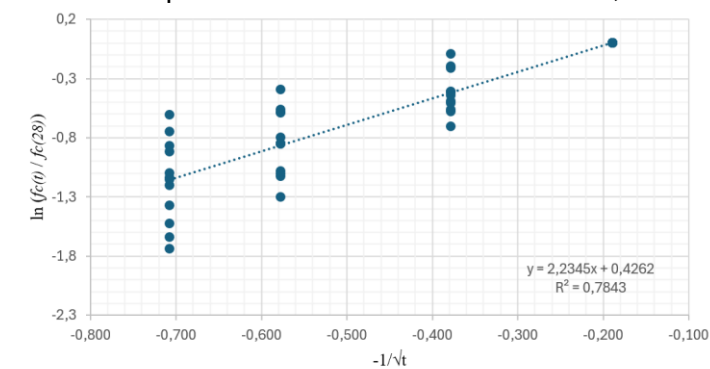


Figura K.36 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1959.

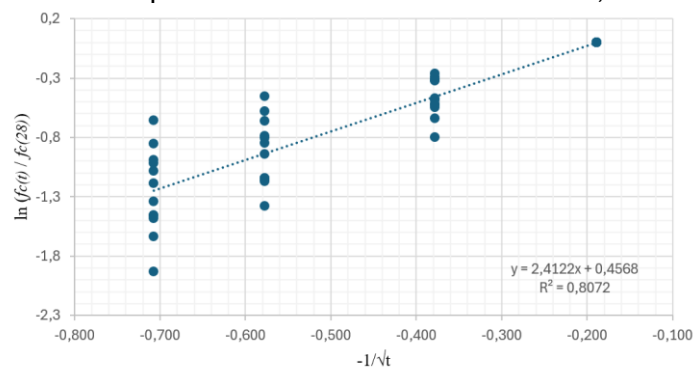


Figura K.37 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1960.

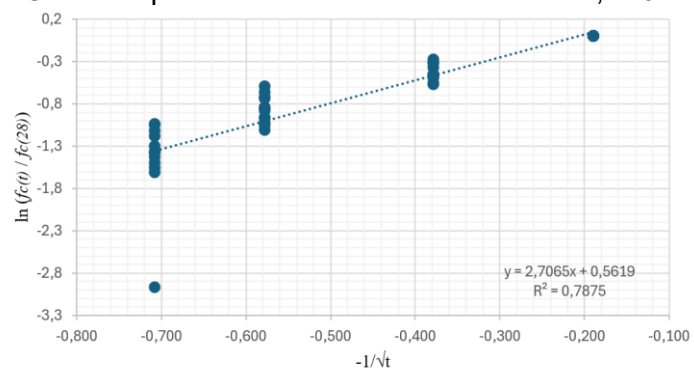


Figura K.38 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1960.

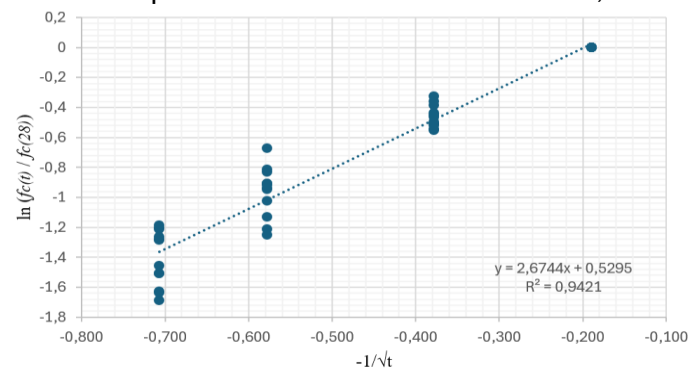


Figura K.39 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1960.

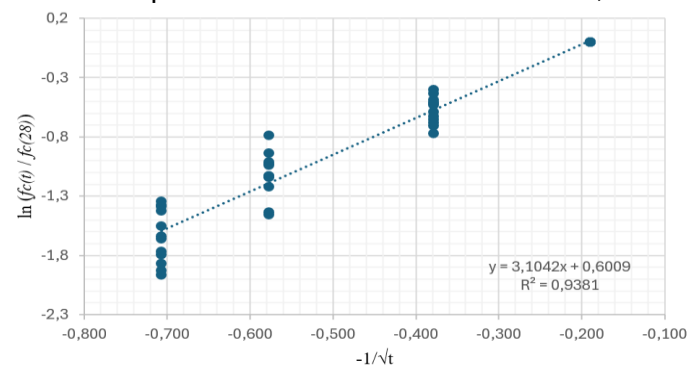


Figura K.40 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1960.

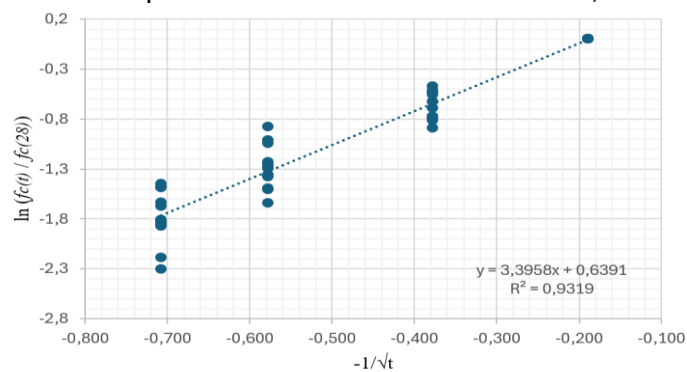


Figura K.41 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1960.

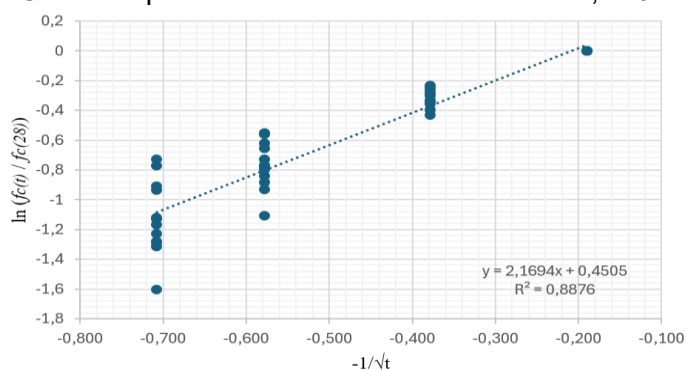


Figura K.42 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1960.

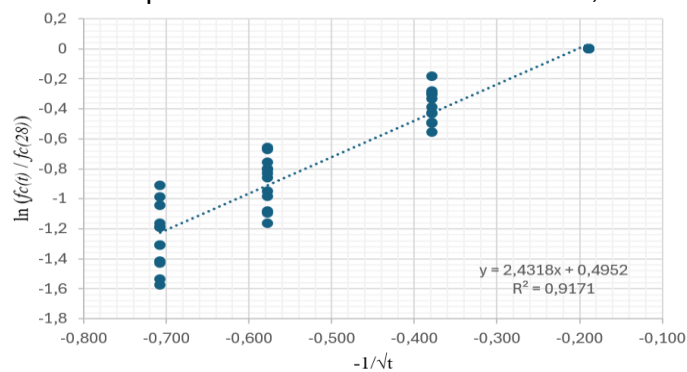


Figura K.43 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1960.

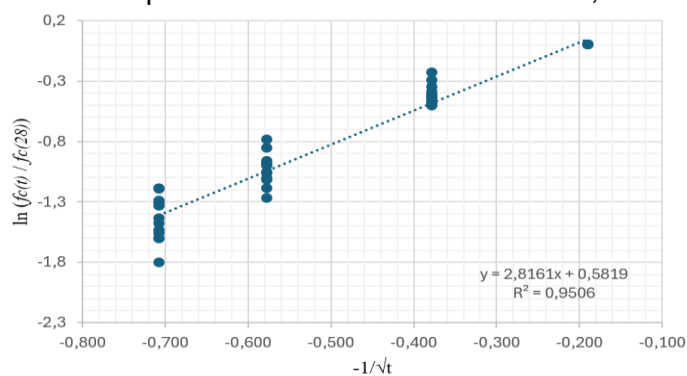


Figura K.44 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1960.

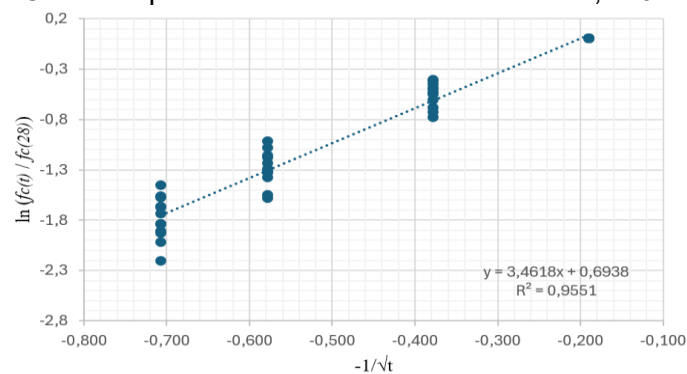


Figura K.45 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1960.

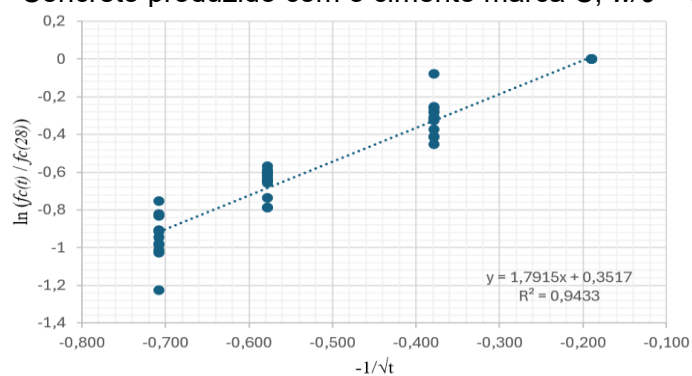


Figura K.46 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1960.

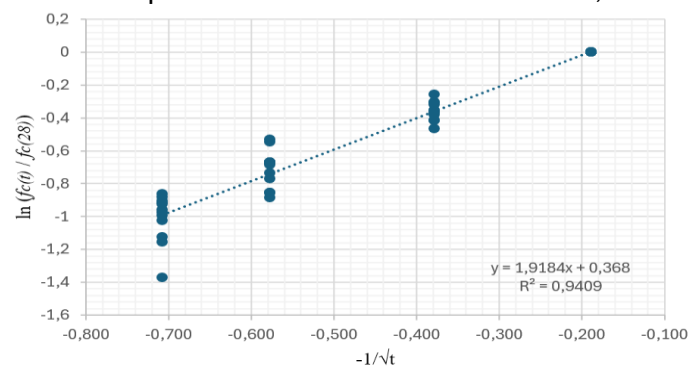


Figura K.47 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1960.

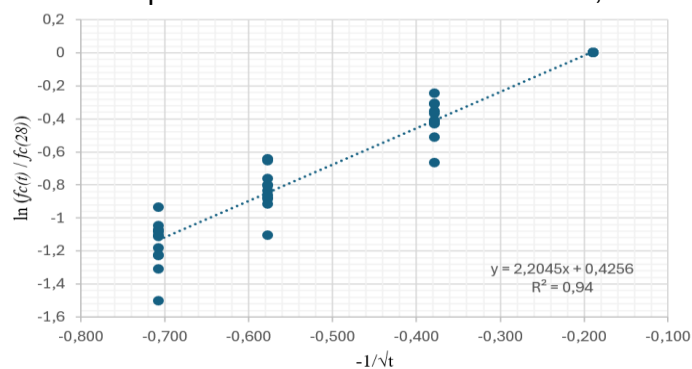


Figura K.48 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1960.

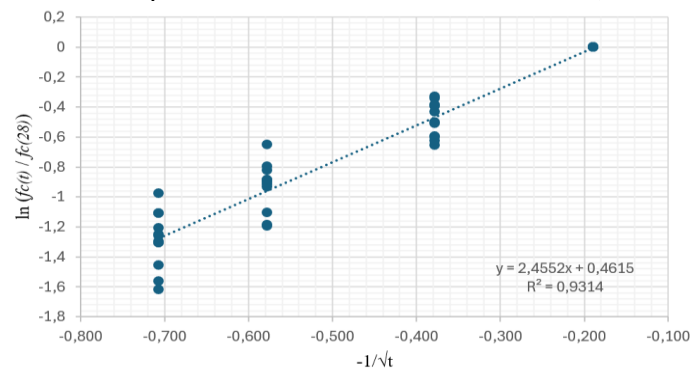


Figura K.49 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1961.

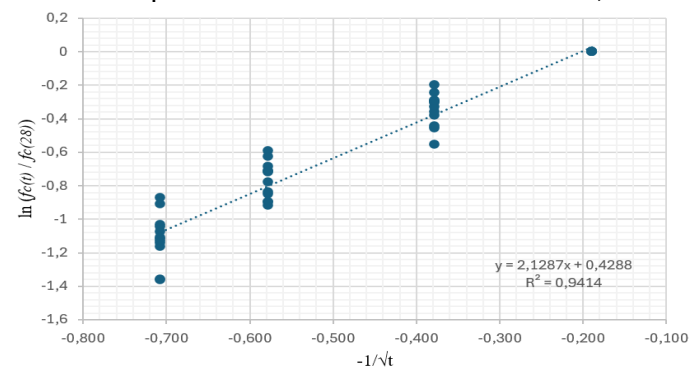


Figura K.50 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1961.

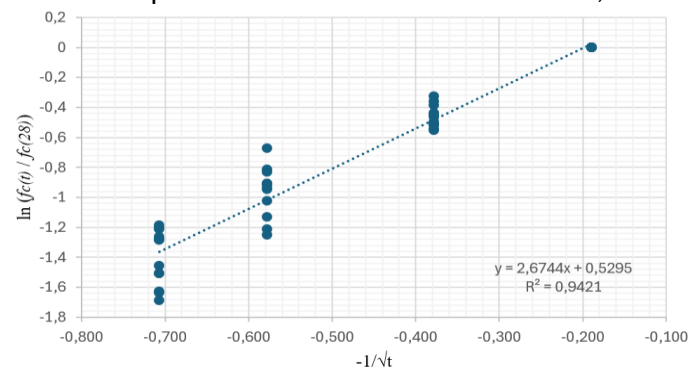


Figura K.51 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1961.

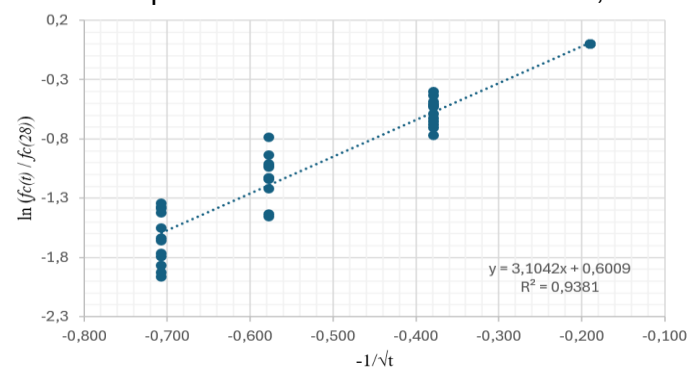


Figura K.52 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1961.

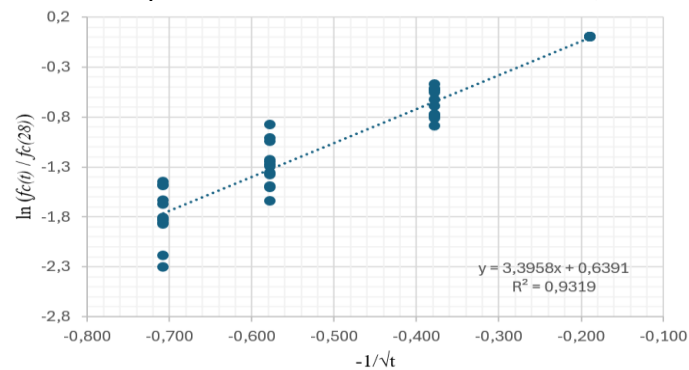


Figura K.53 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1961.

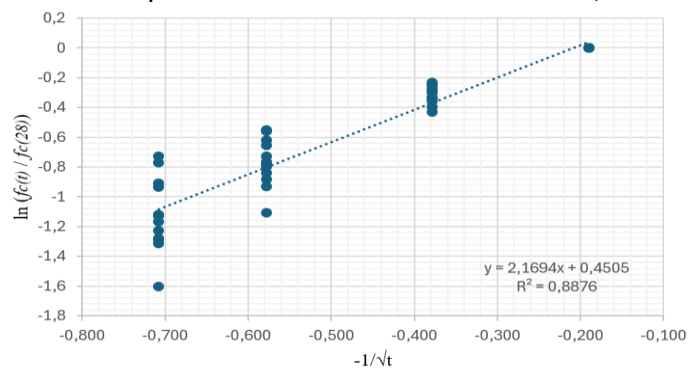


Figura K.54 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1961.

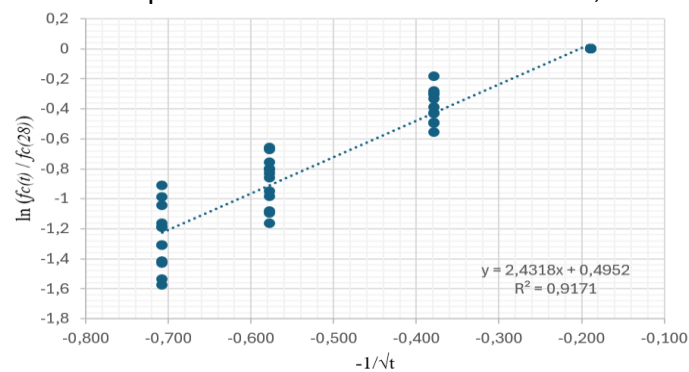


Figura K.55 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1961.

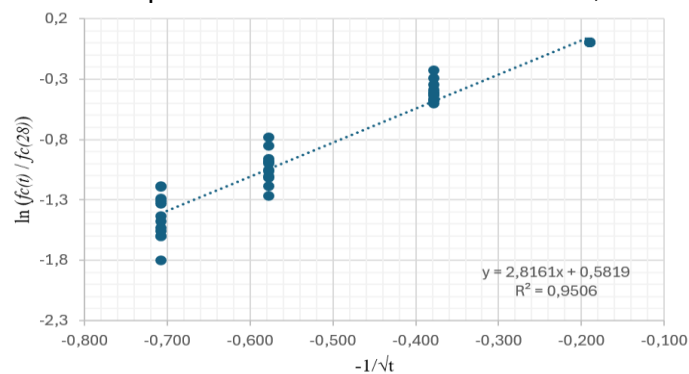


Figura K.56 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1961.

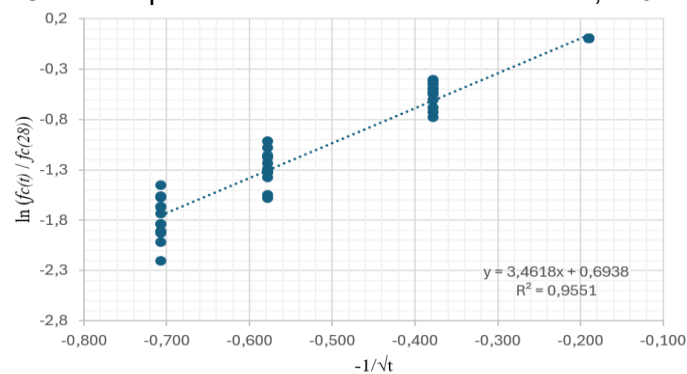


Figura K.57 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1961.

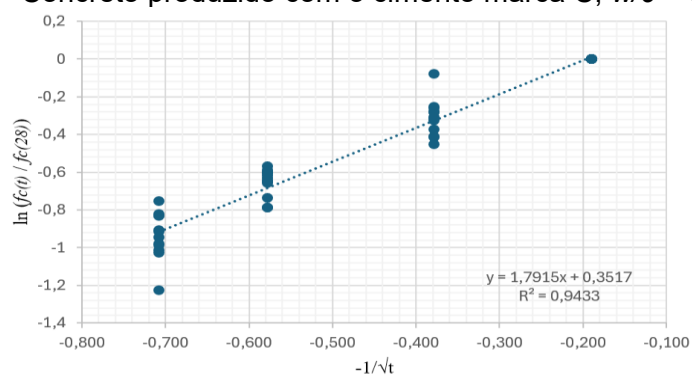


Figura K.58 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1961.

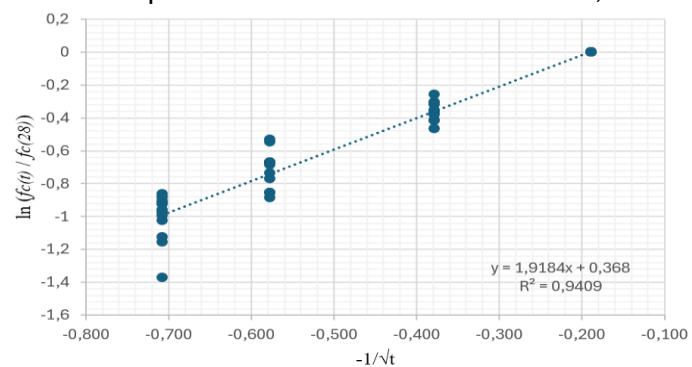


Figura K.59 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1961.

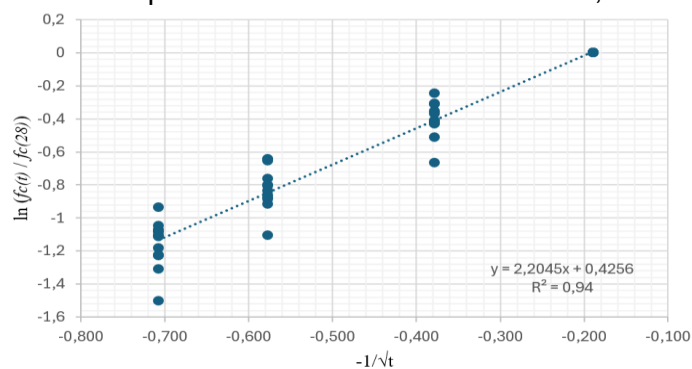


Figura K.60 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1961.

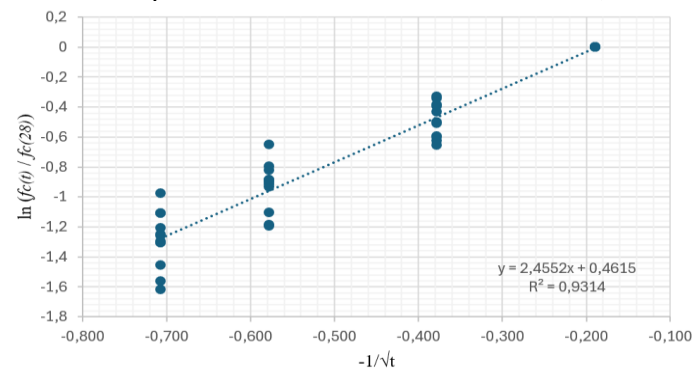


Figura K.61 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1962.

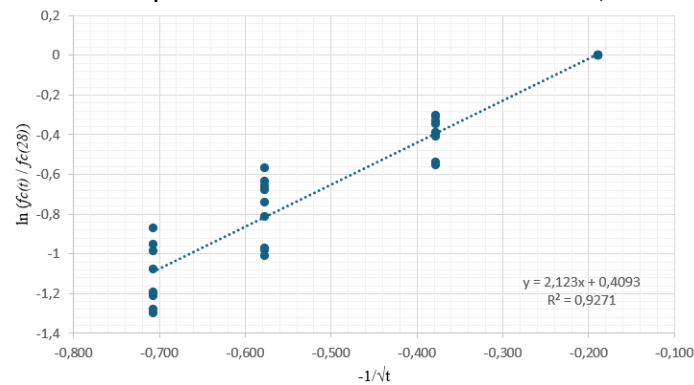


Figura K.62 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1962.

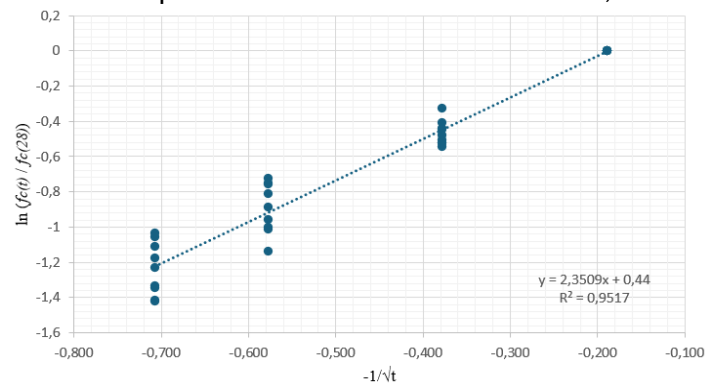


Figura K.63 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1962.

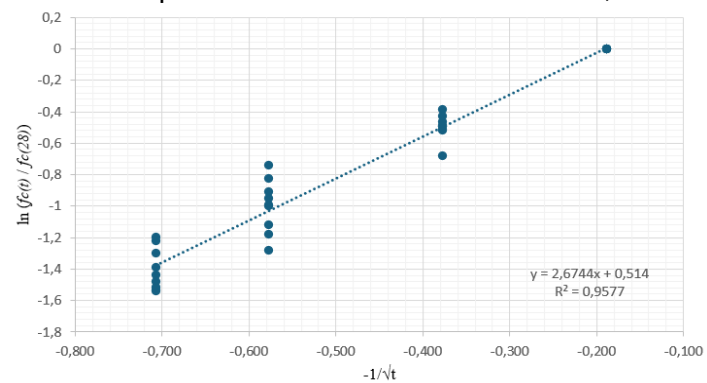


Figura K.64 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1962.

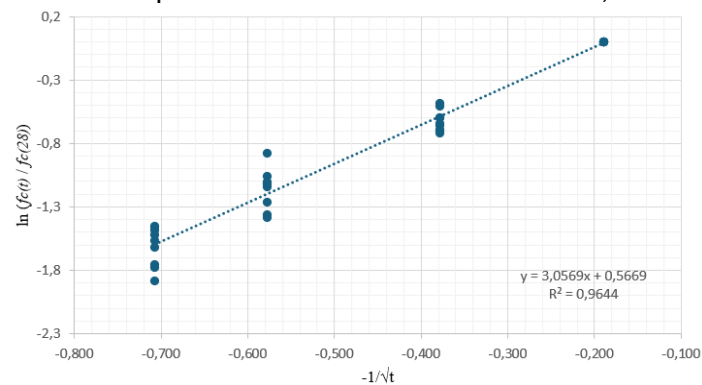


Figura K.65 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1962.

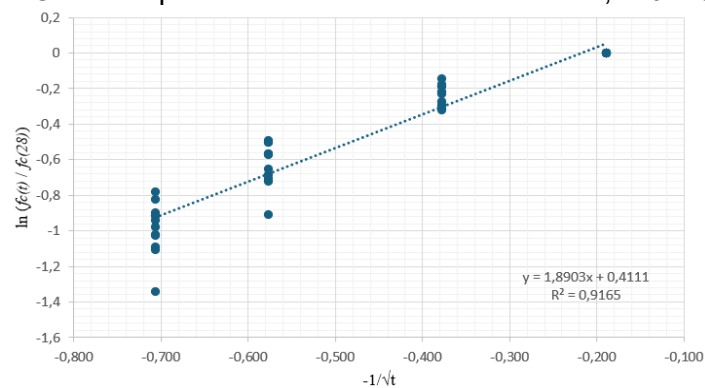


Figura K.66 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1962.

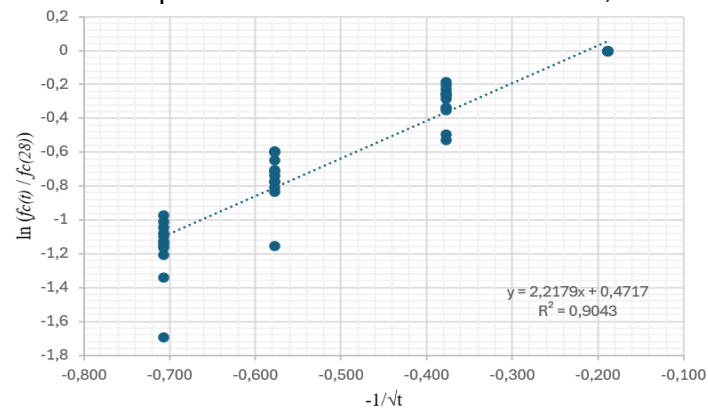


Figura K.67 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1962.

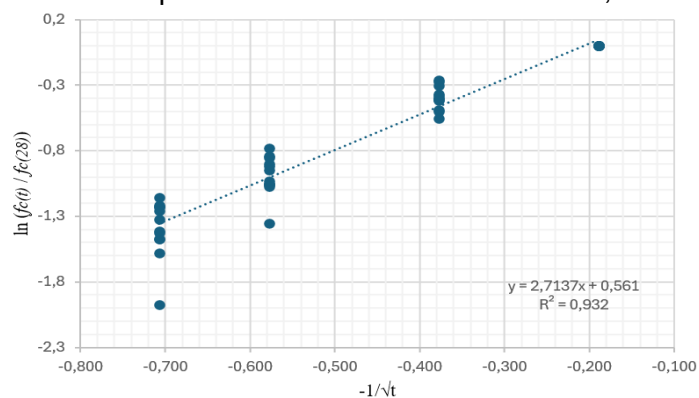


Figura K.68 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1962.

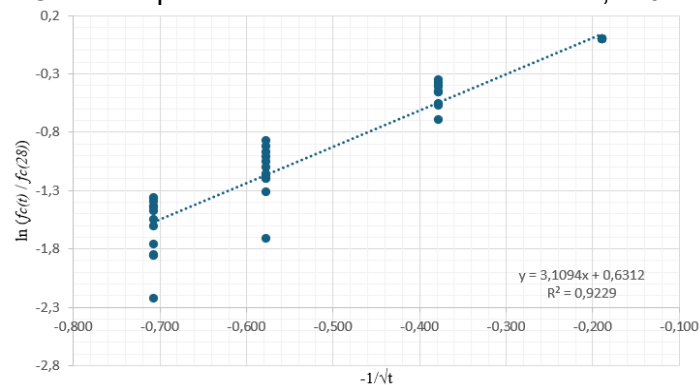


Figura K.69 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1962.

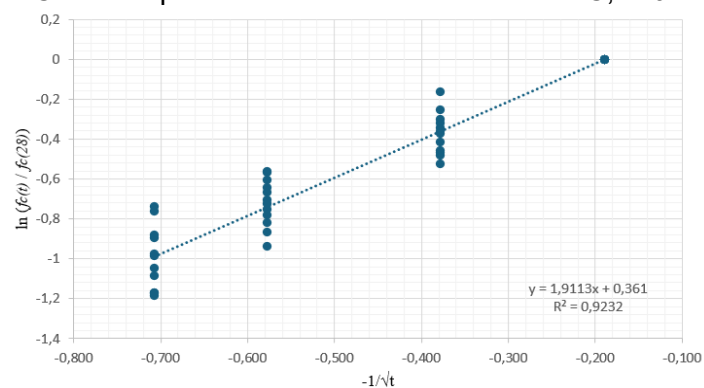


Figura K.70 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1962.

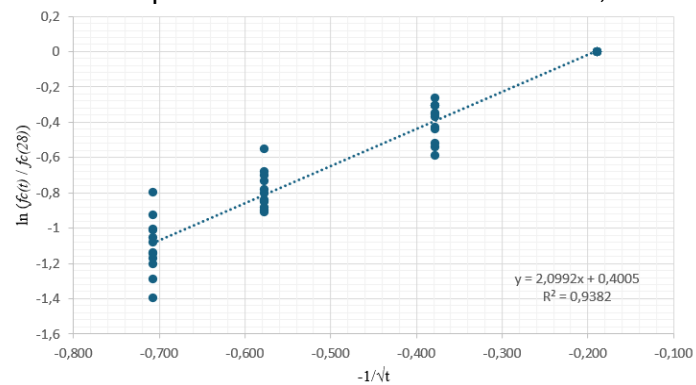


Figura K.71 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1962.

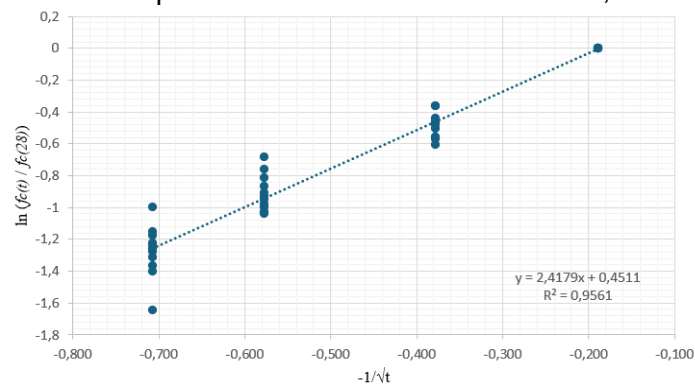


Figura K.72 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1962.

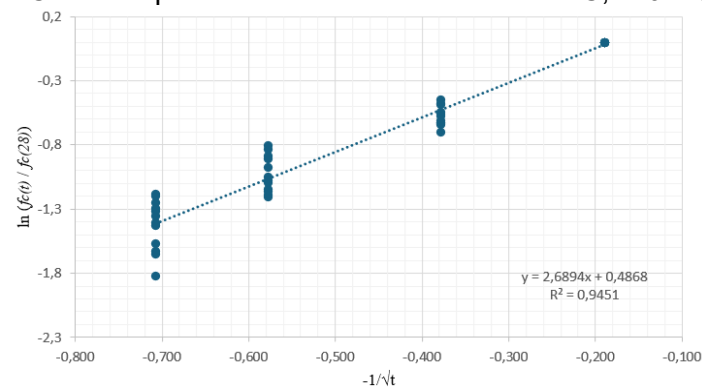


Figura K.73 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1963.

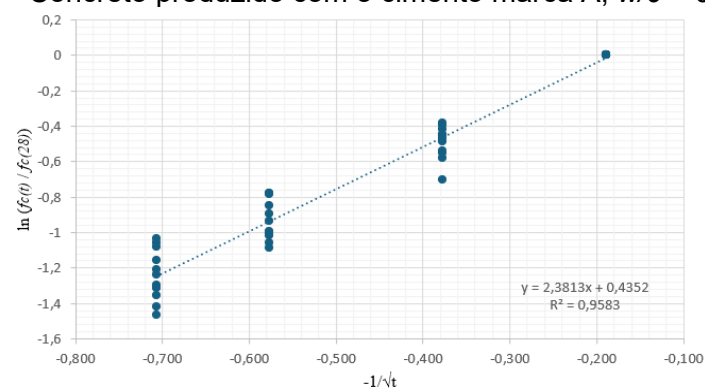


Figura K.74 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1963.

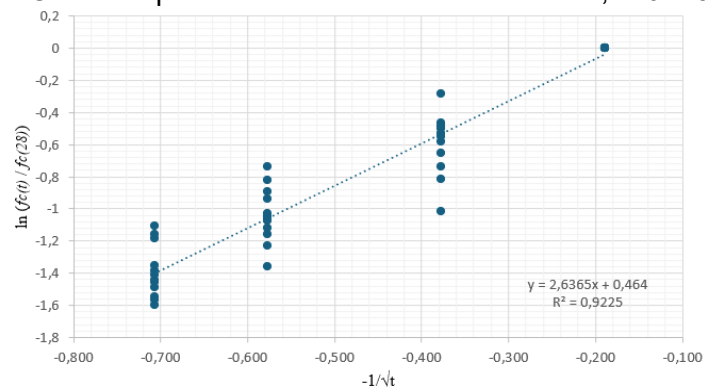


Figura K.75 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1963.

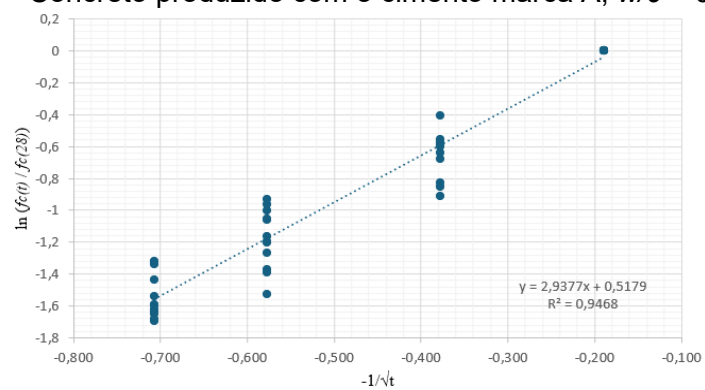


Figura K.76 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1963.

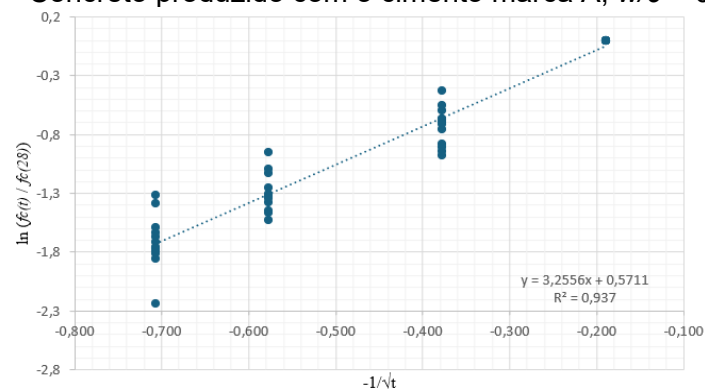


Figura K.77 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1963.

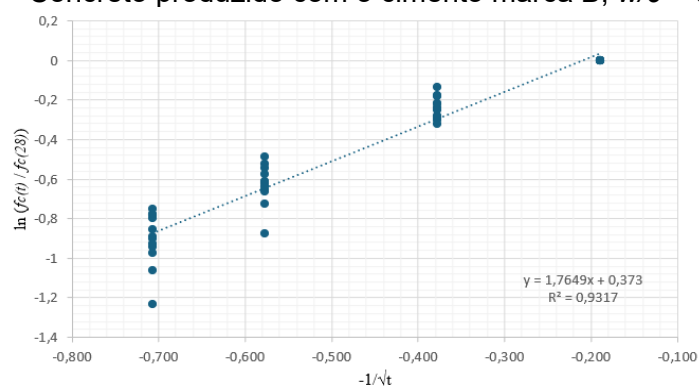


Figura K.78 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1963.

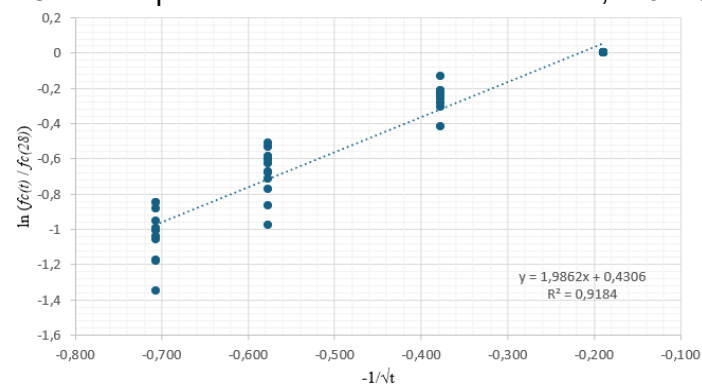


Figura K.79 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1963.

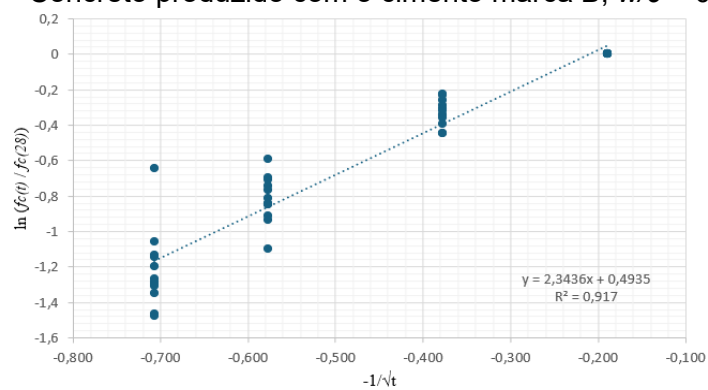


Figura K.80 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1963.

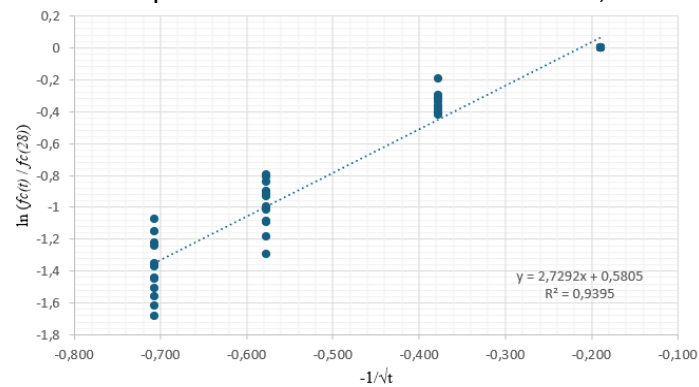


Figura K.81 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1963.

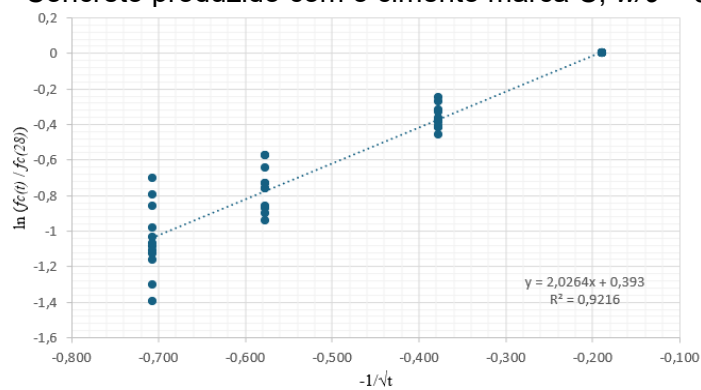


Figura K.82 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1963.

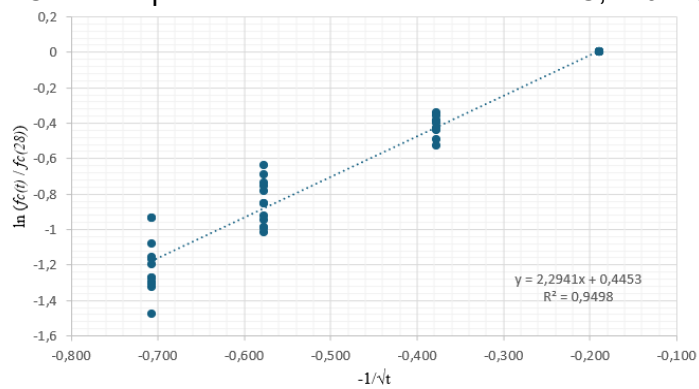


Figura K.83 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1963.

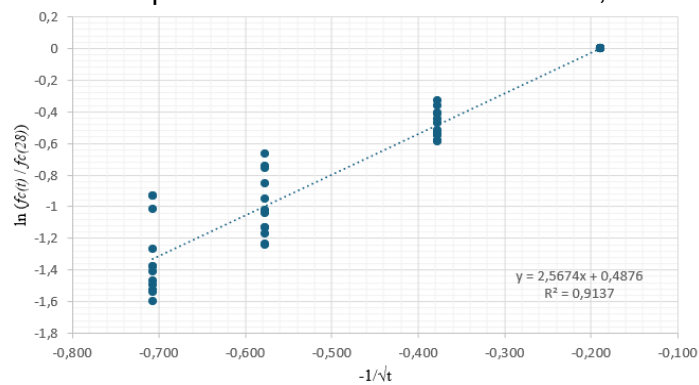


Figura K.84 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1963.

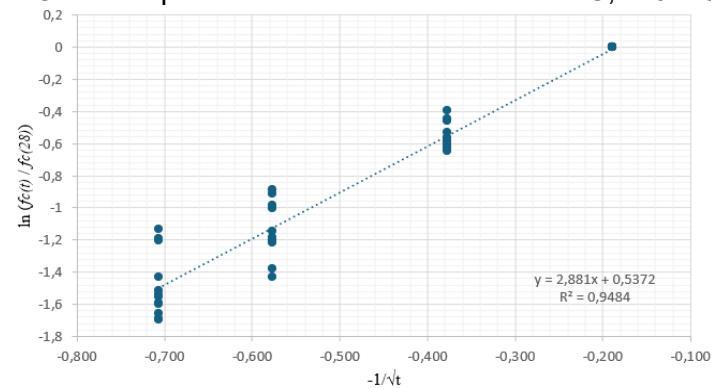


Figura K.85 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1964.

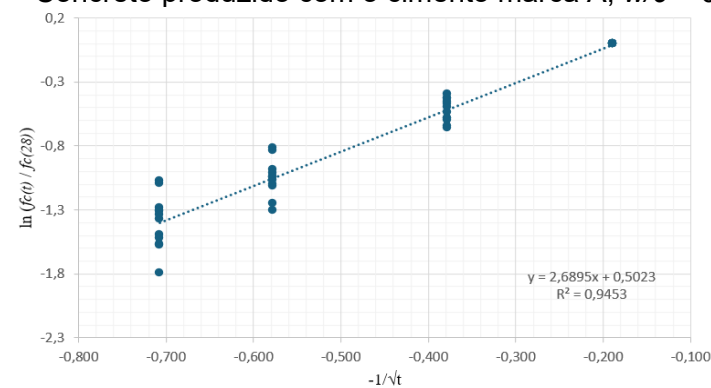


Figura K.86 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1964.

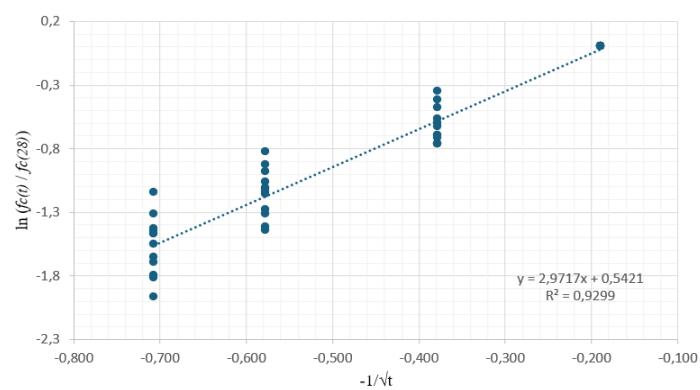


Figura K.87 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1964.

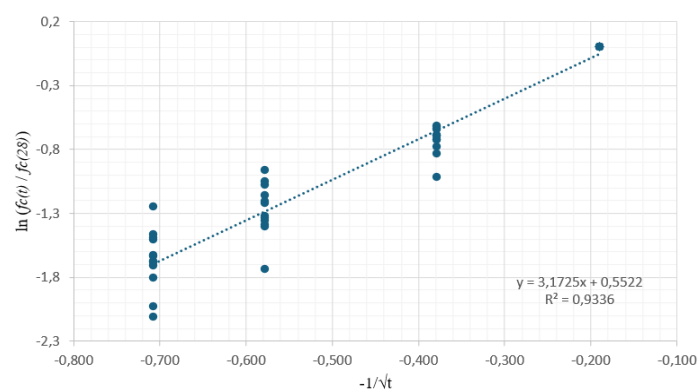


Figura K.88 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1964.

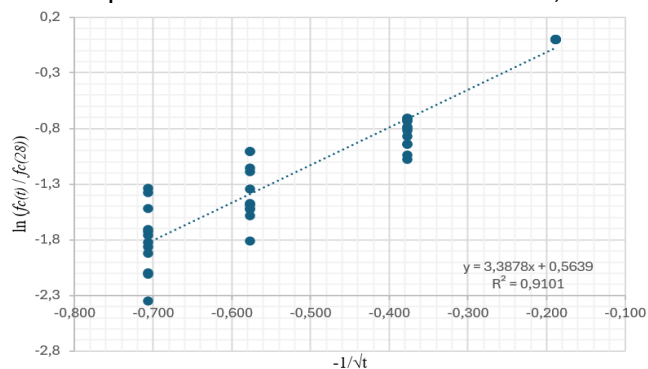


Figura K.89 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1964.

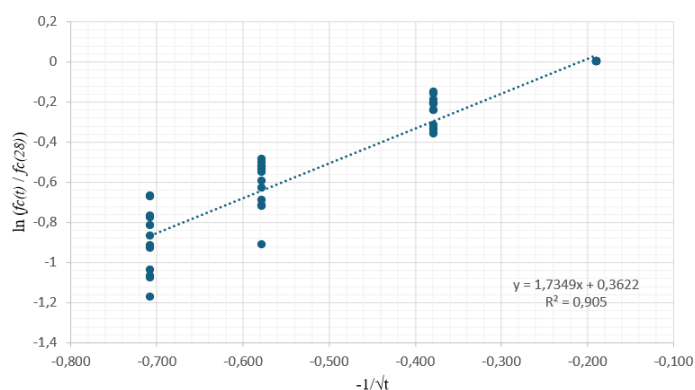


Figura K.90 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1964.

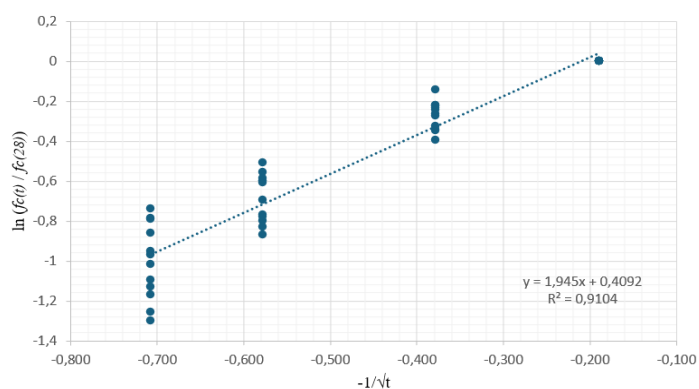


Figura K.91 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1964.

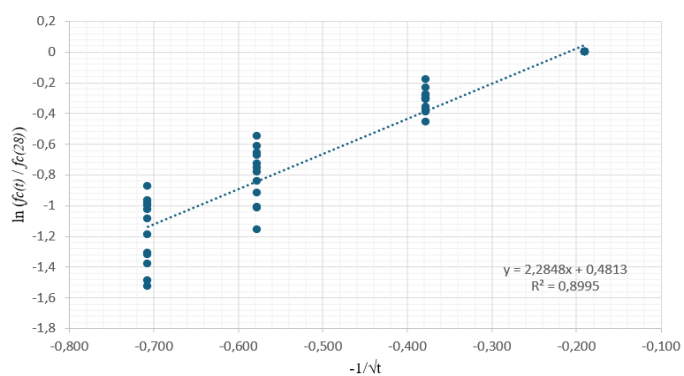


Figura K.92 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1964.

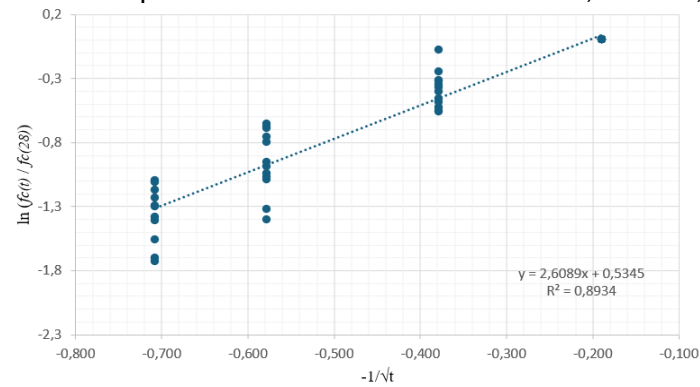


Figura K.93 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1964.

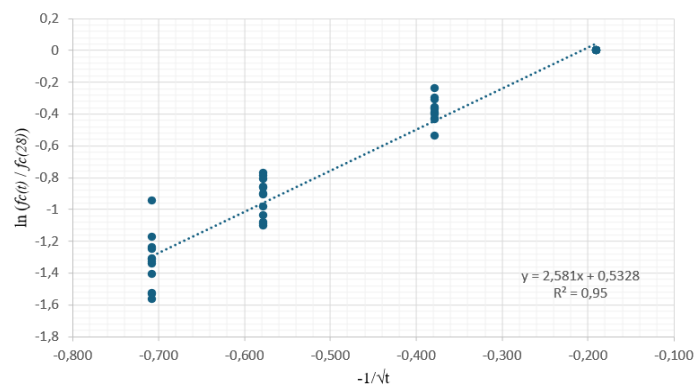


Figura K.94 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1964.

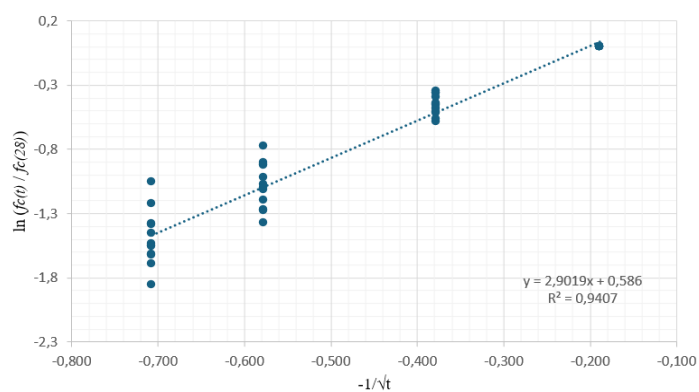


Figura K.95 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1964.

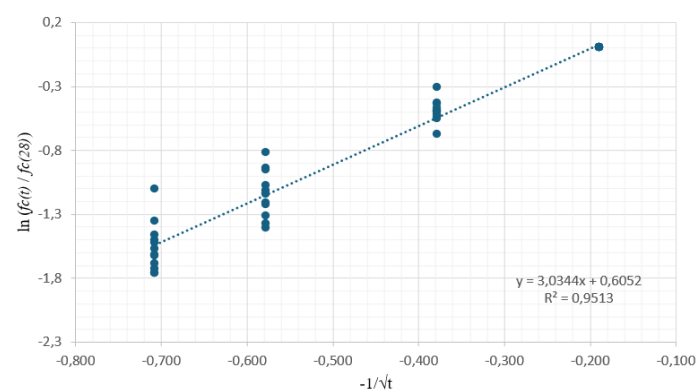


Figura K.96 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1964.

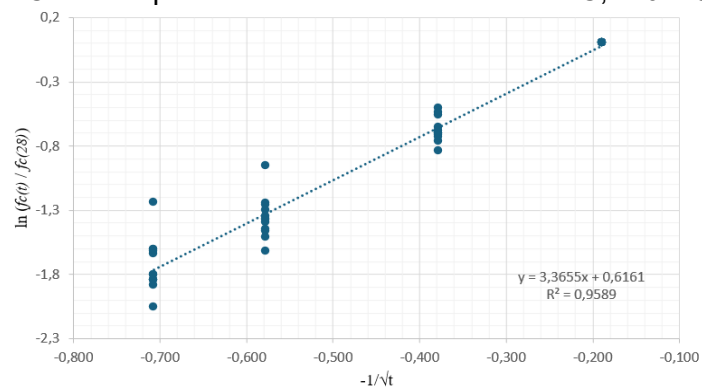


Figura K.97 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1965.

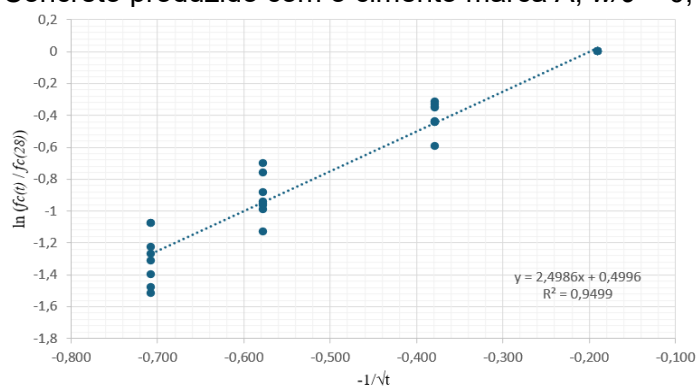


Figura K.98 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1965.

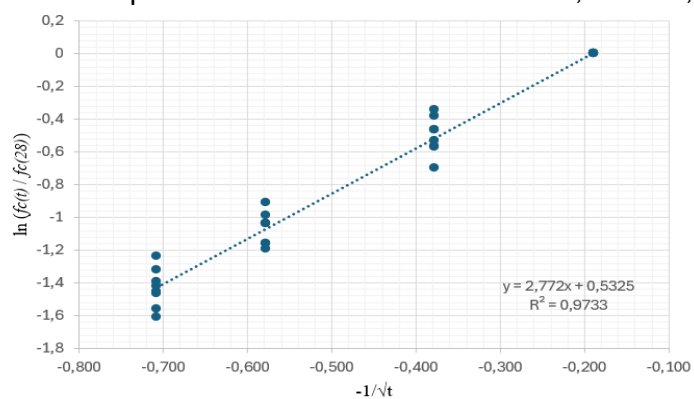


Figura K.99 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1965.

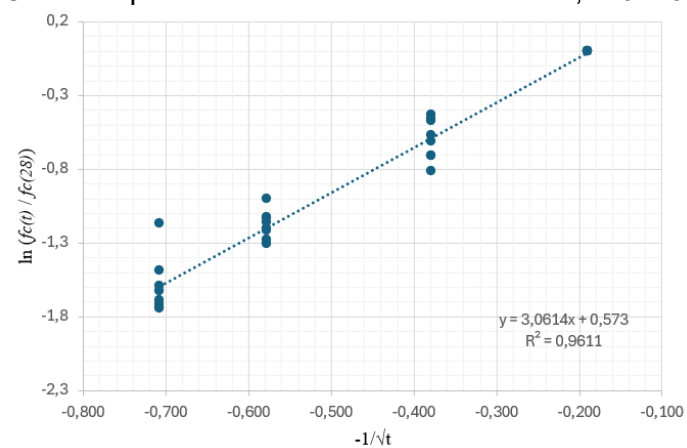


Figura K.100 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1965.

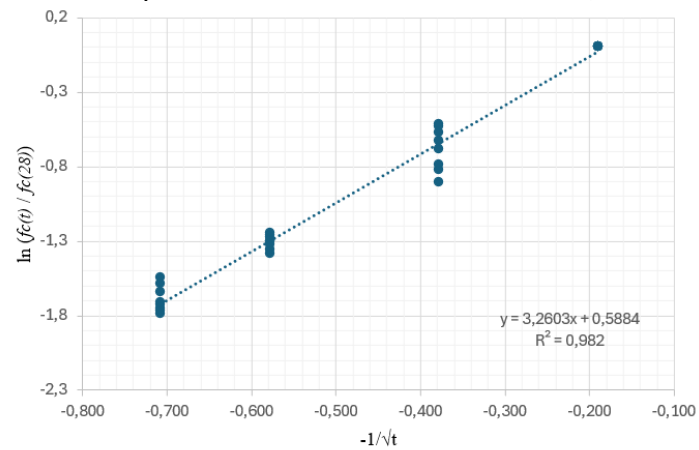


Figura K.101 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1965.

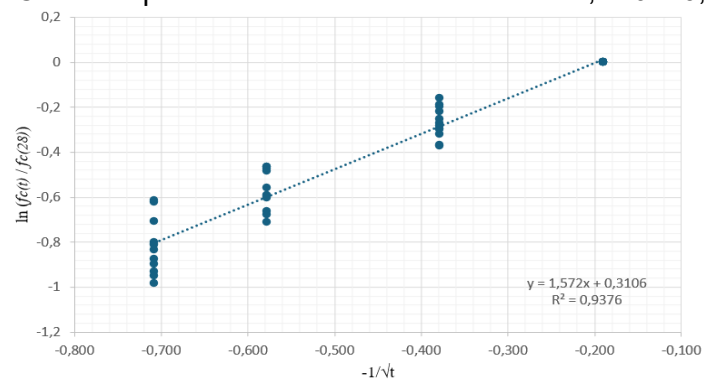


Figura K.102 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1965.

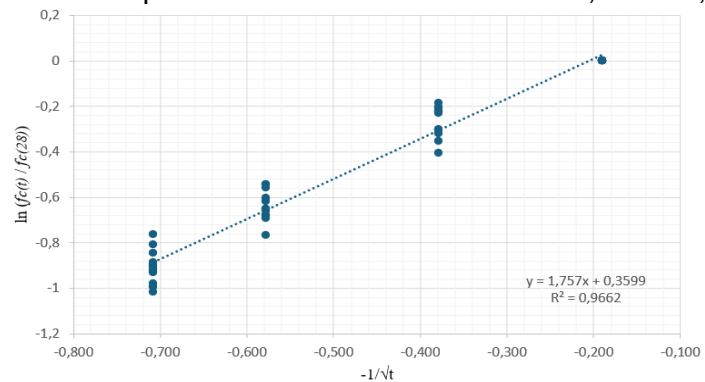


Figura K.103 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1965.

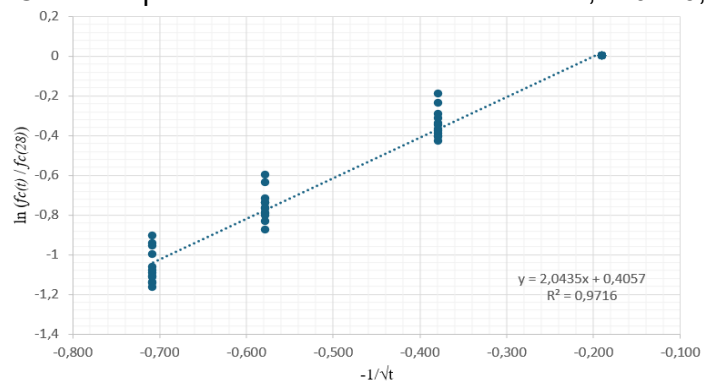


Figura K.104 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1965.

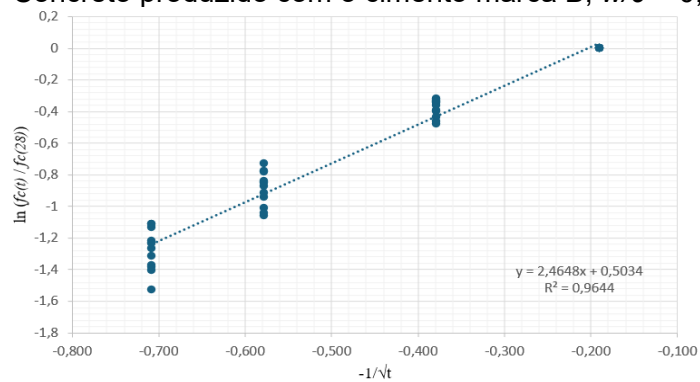


Figura K.105 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1965.

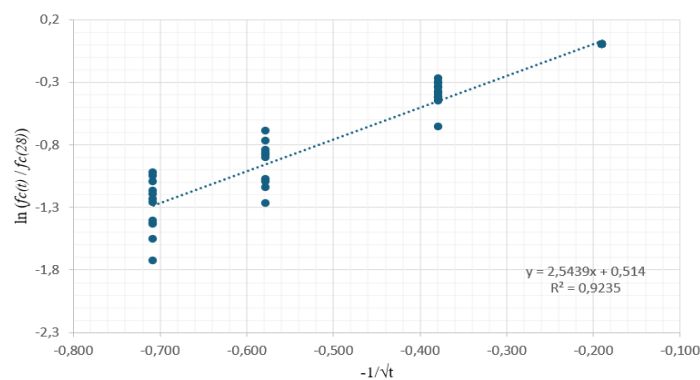


Figura K.106 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1965.

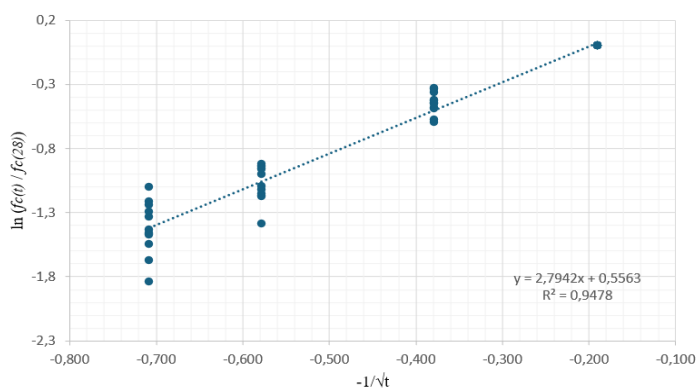


Figura K.107 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1965.

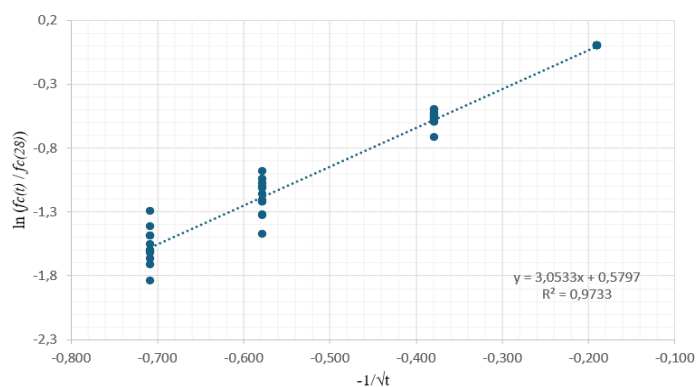


Figura K.108 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1965.

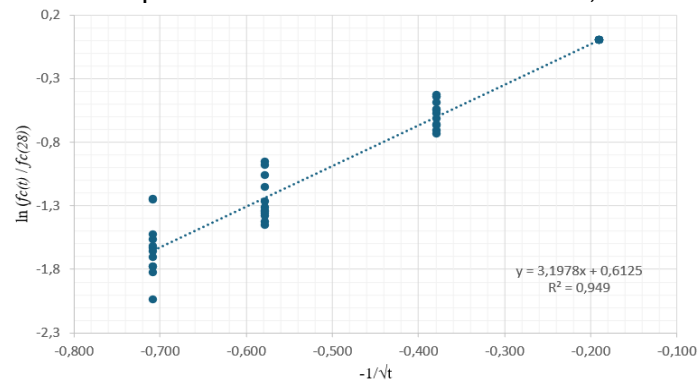


Figura K.109 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1966.

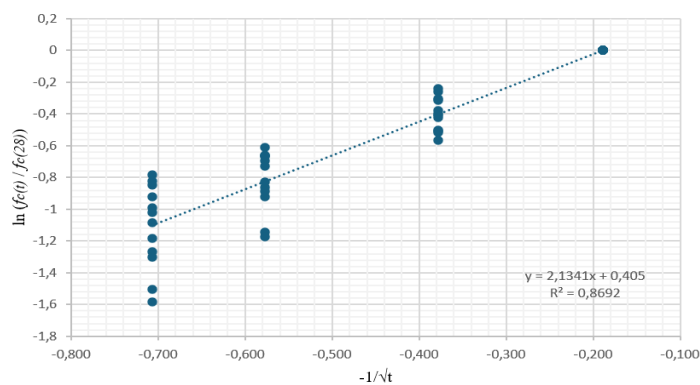


Figura K.110 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1966.

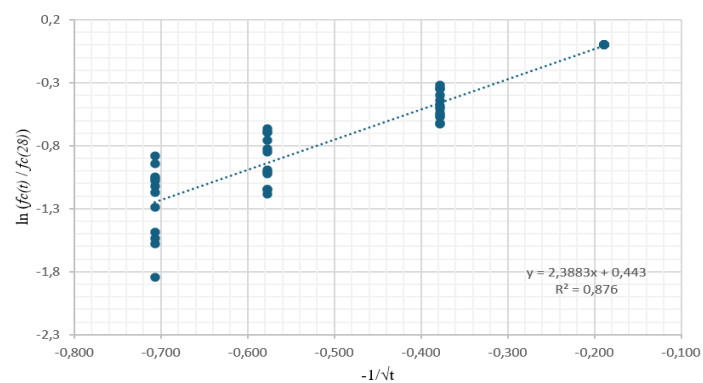


Figura K.111 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1966.

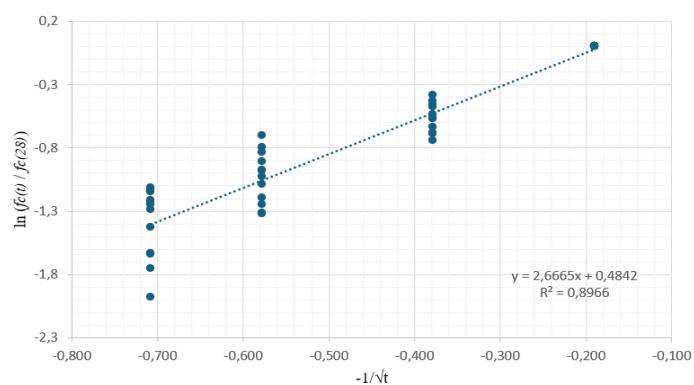


Figura K.112 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1966.

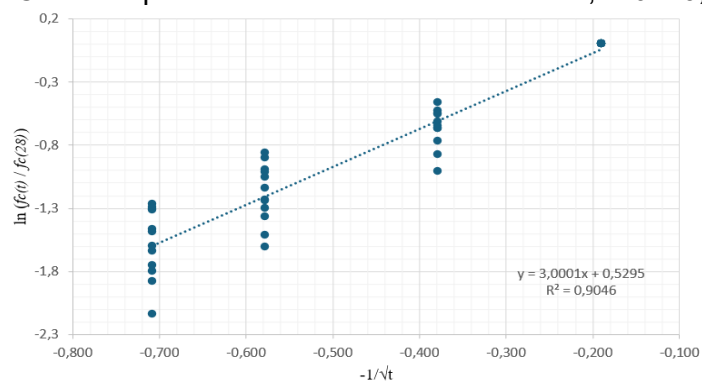


Figura K.113 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1966.

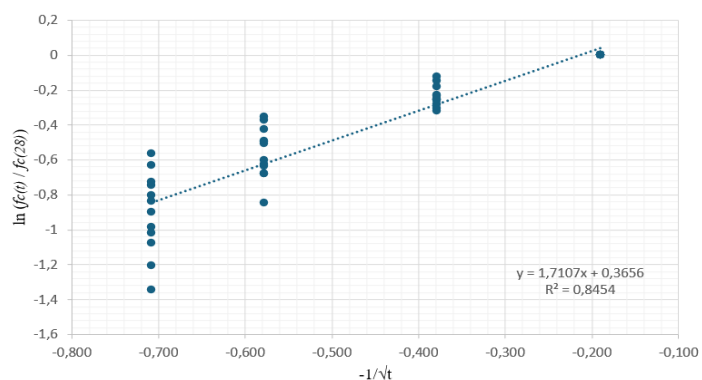


Figura K.114 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1966.

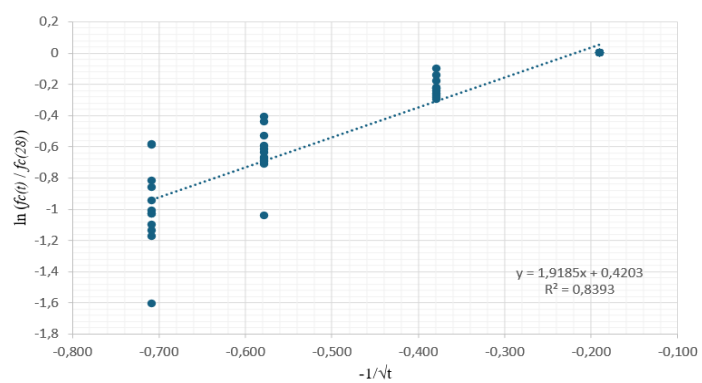


Figura K.115 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1966.

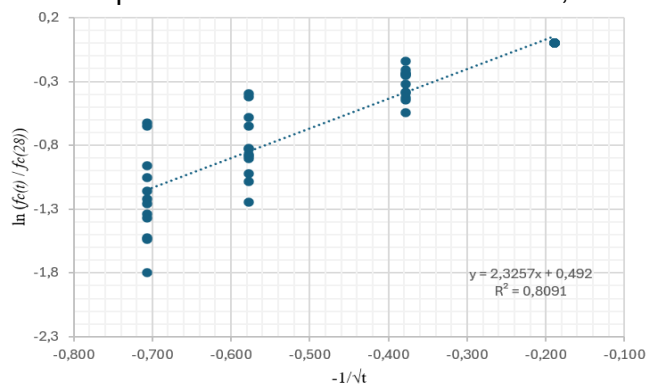


Figura K.116 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1966.

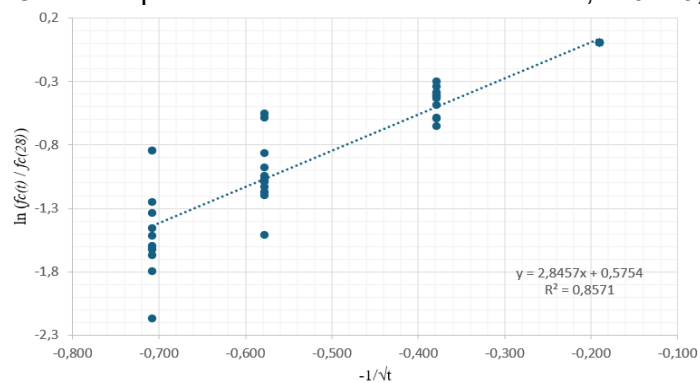


Figura K.117 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1966.

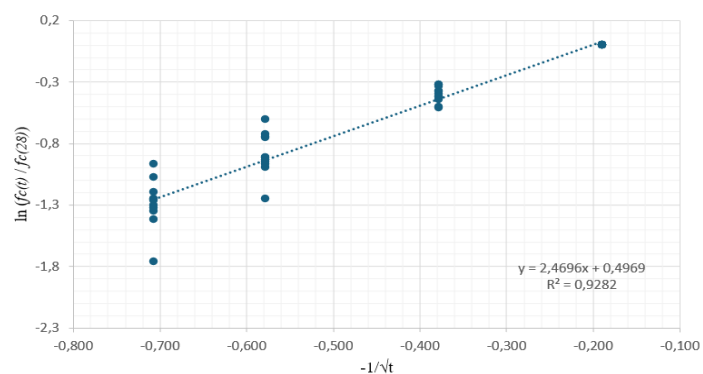


Figura K.118 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1966.

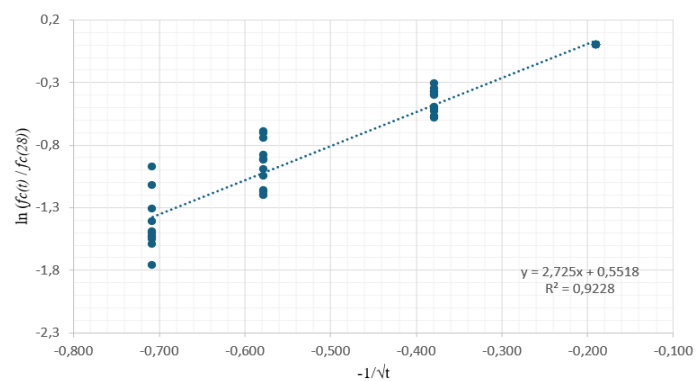


Figura K.119 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1966.

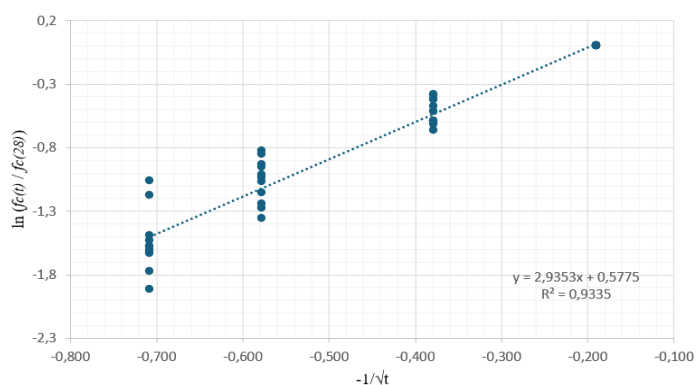


Figura K.120 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1966.

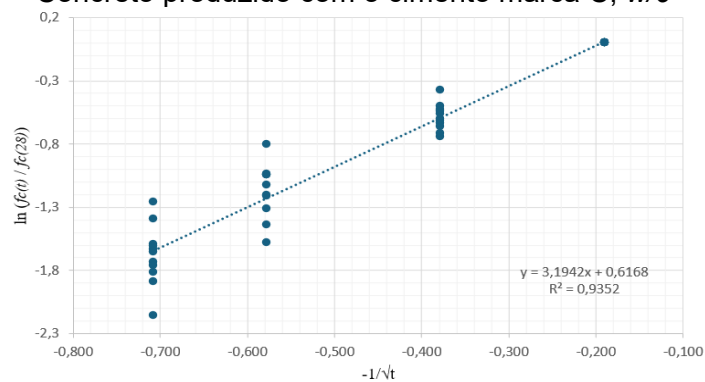


Figura K.121 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1967.

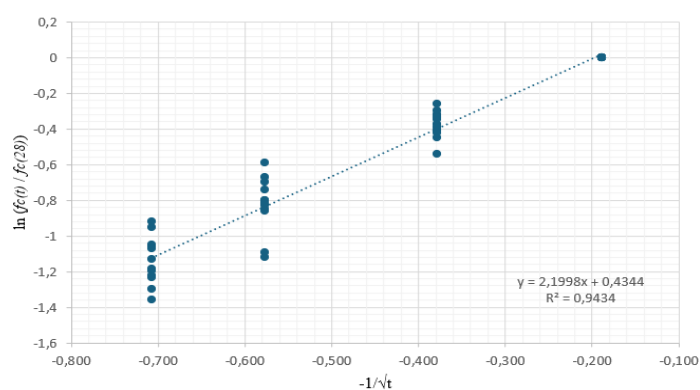


Figura K.122 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1967.

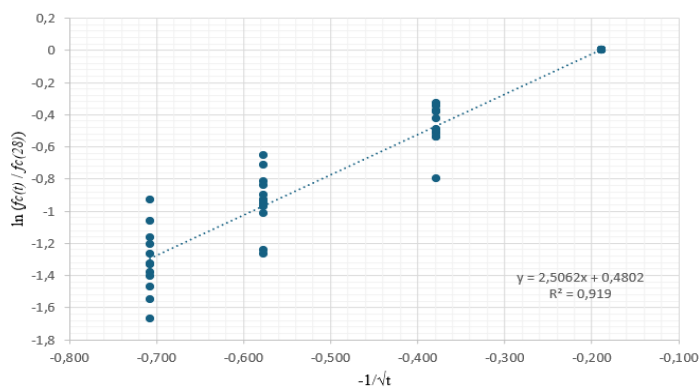


Figura K.123 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1967.

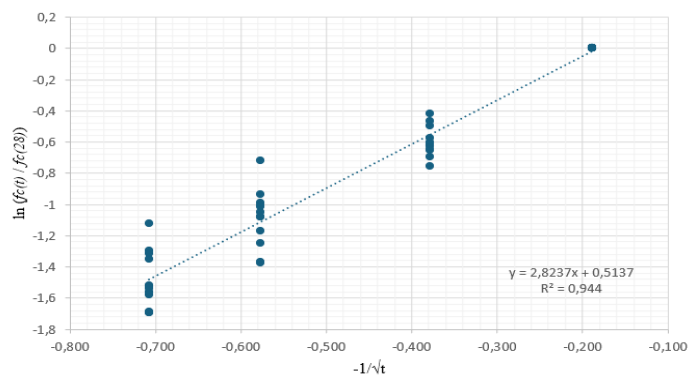


Figura K.124 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1967.

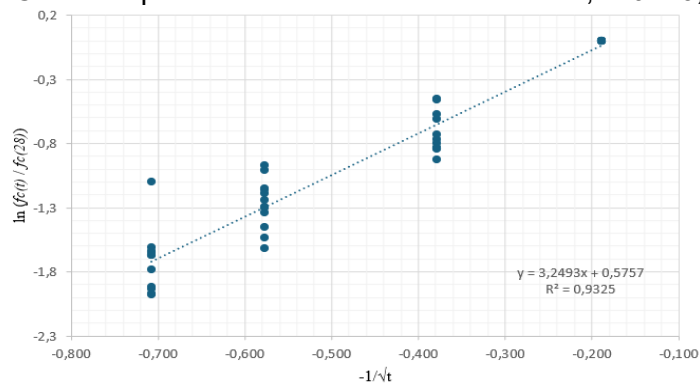


Figura K.125 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1967.

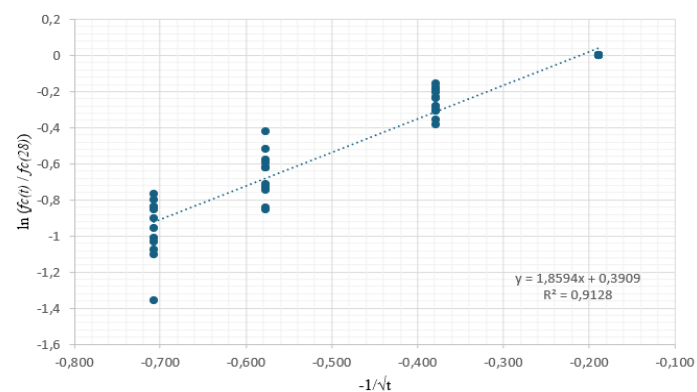


Figura K.126 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1967.

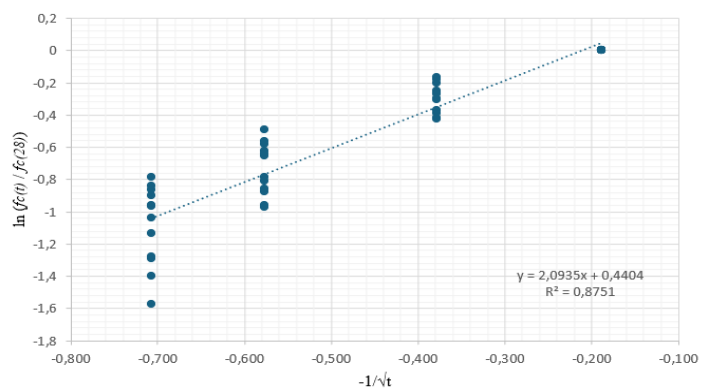


Figura K.127 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1967.

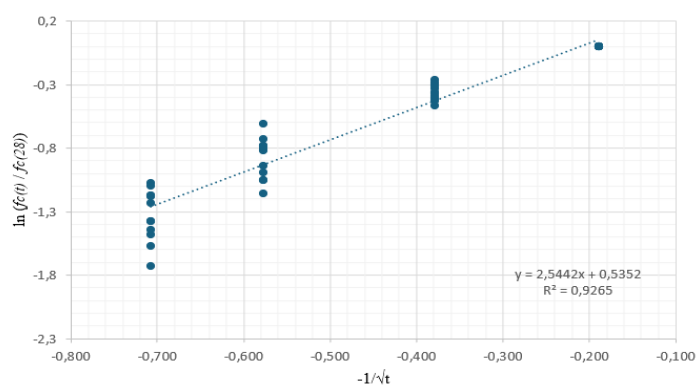


Figura K.128 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1967.

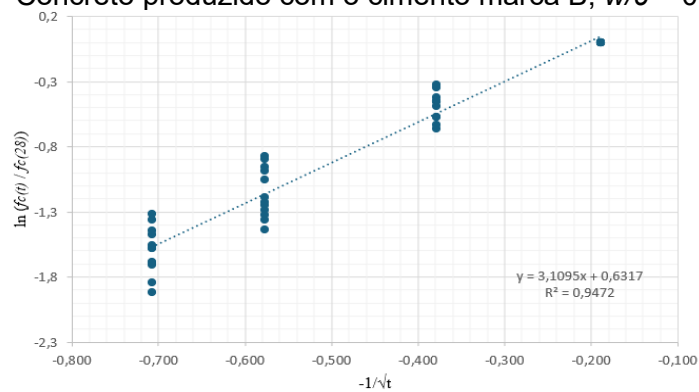


Figura K.129 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1967.

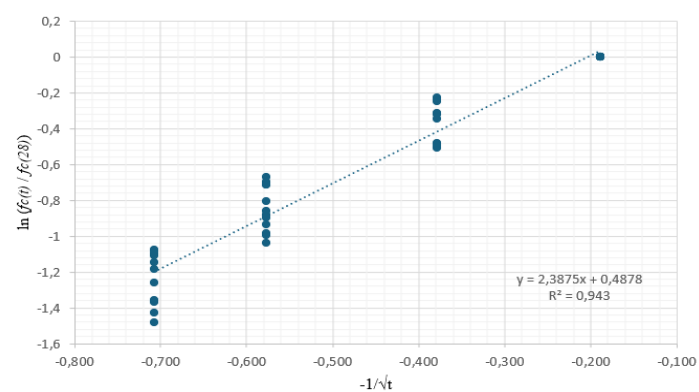


Figura K.130 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1967.

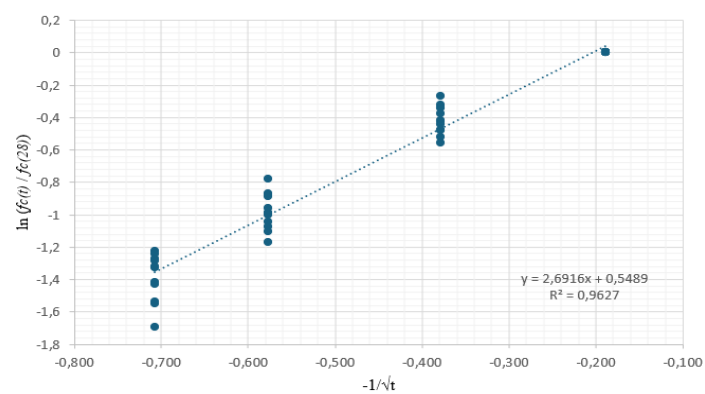


Figura K.131 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1967.

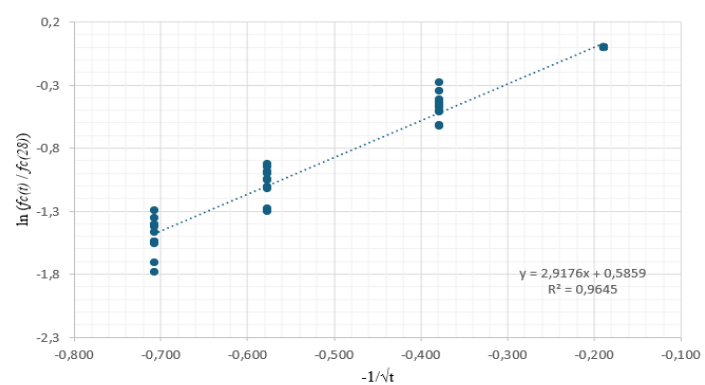


Figura K.132 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1967.

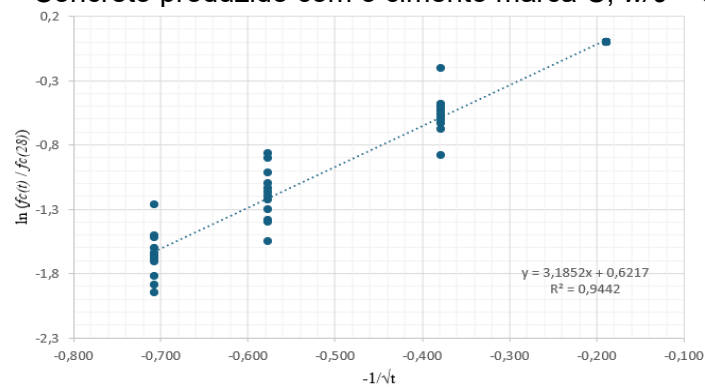


Figura K.133 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1968.

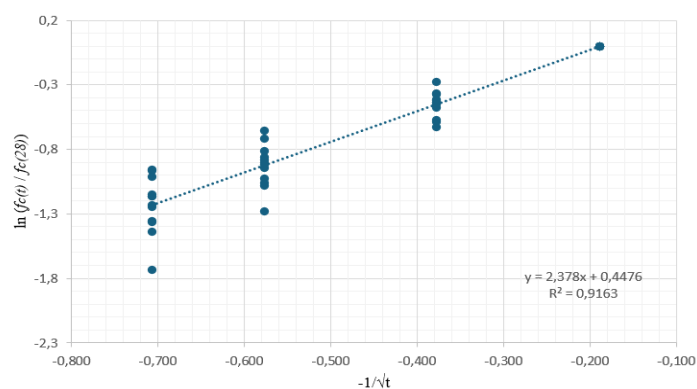


Figura K.134 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1968.

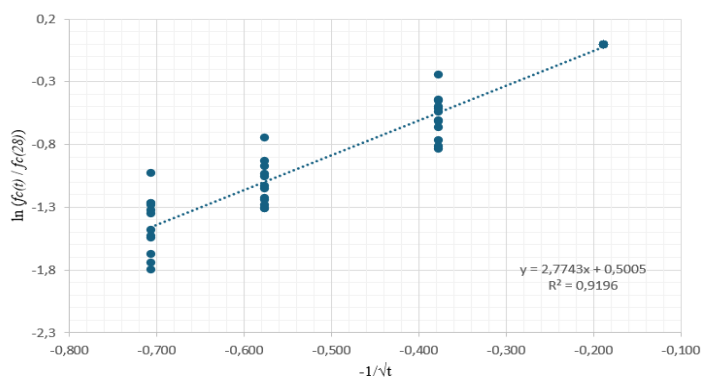


Figura K.135 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1968.

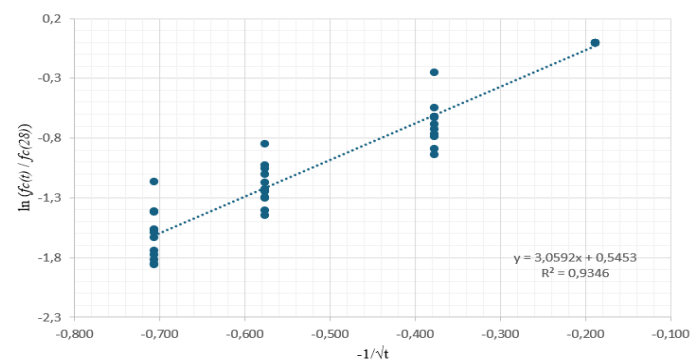


Figura K.136 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1968.

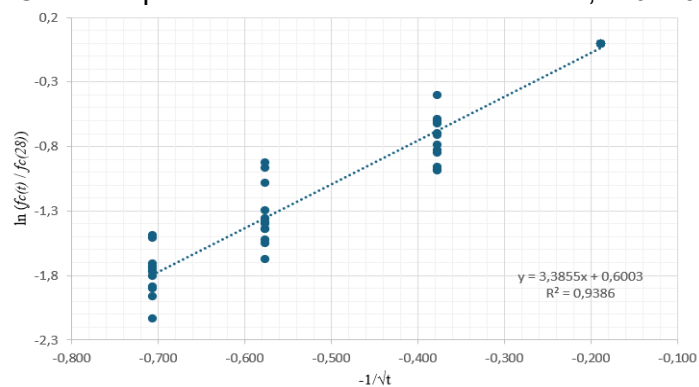


Figura K.137 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1968.

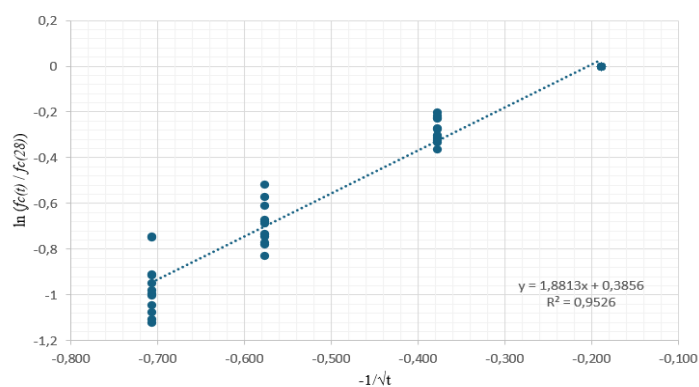


Figura K.138 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1968.

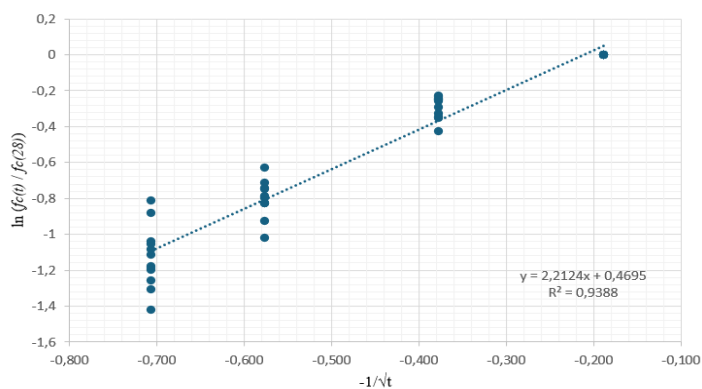


Figura K.139 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1968.

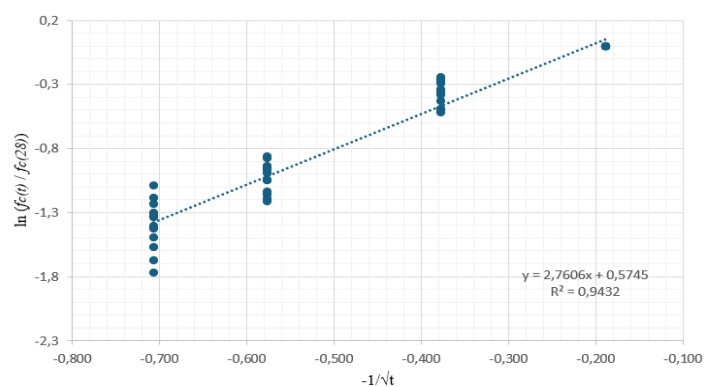


Figura K.140 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1968.

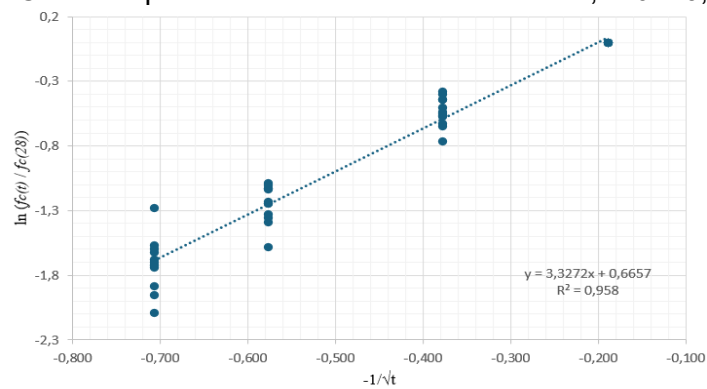


Figura K.141 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1968.

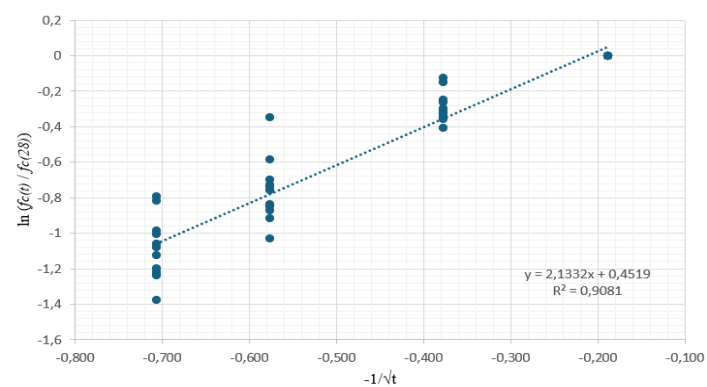


Figura K.142 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1968.

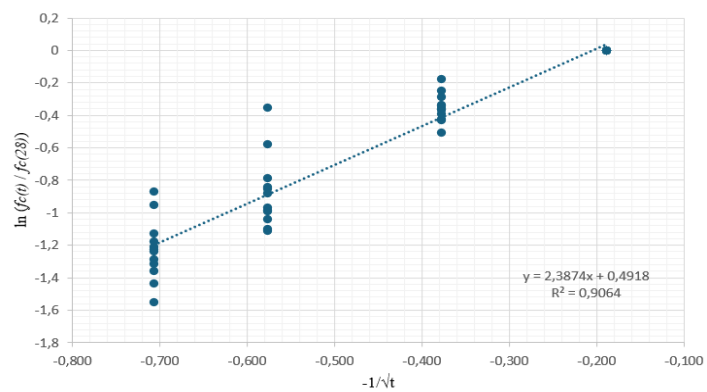


Figura K.143 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1968.

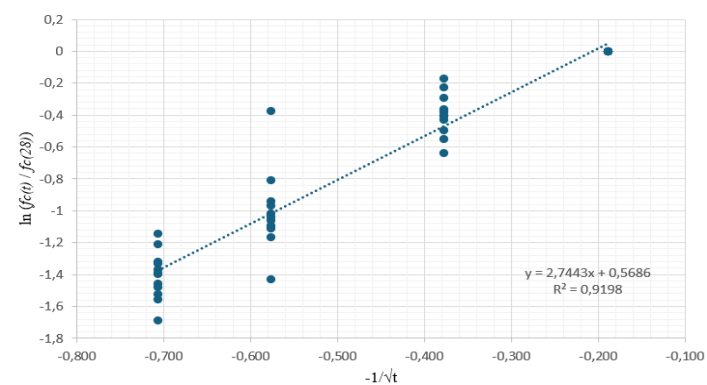


Figura K.144 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1968.

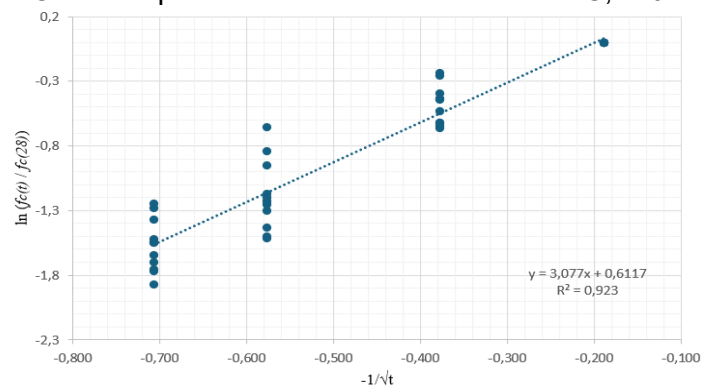


Figura K.145 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1969.

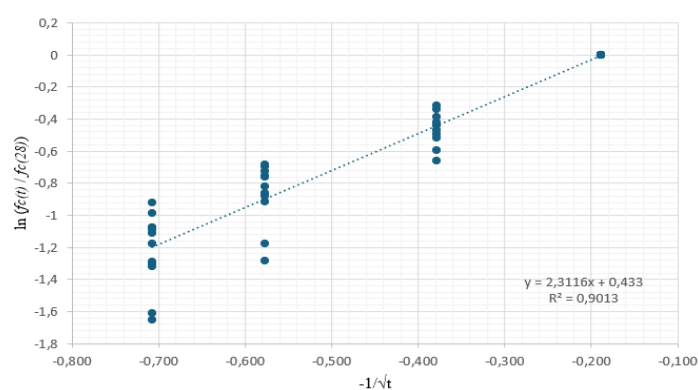


Figura K.146 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1969.

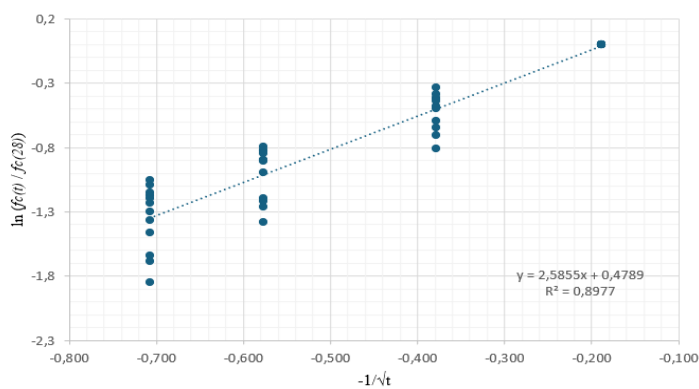


Figura K.147 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1969.

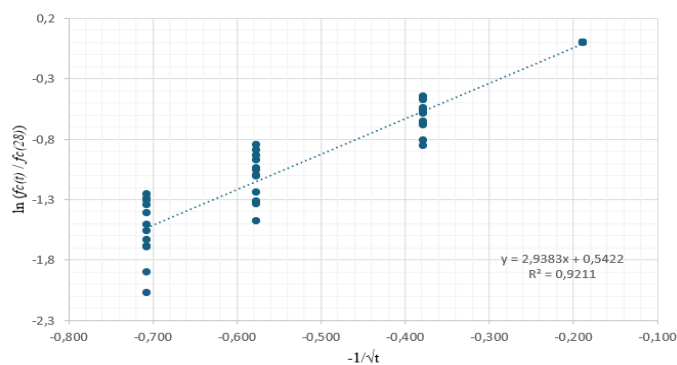


Figura K.148 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1969.

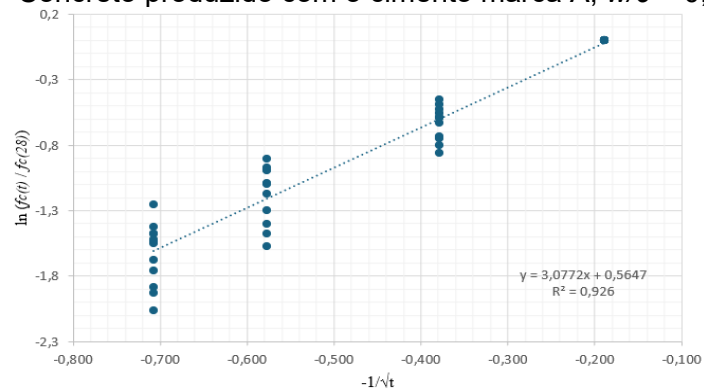


Figura K.149 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1969.

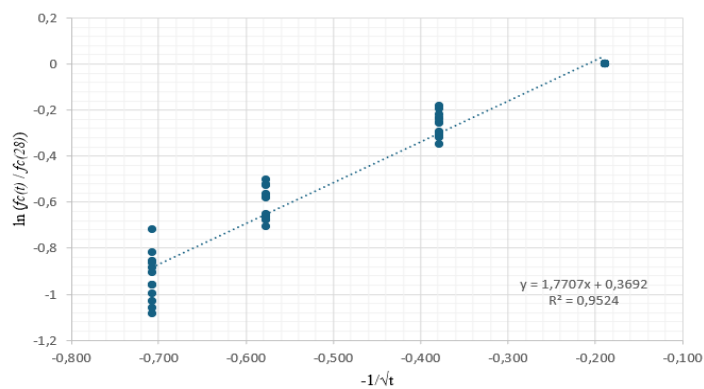


Figura K.150 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1969.

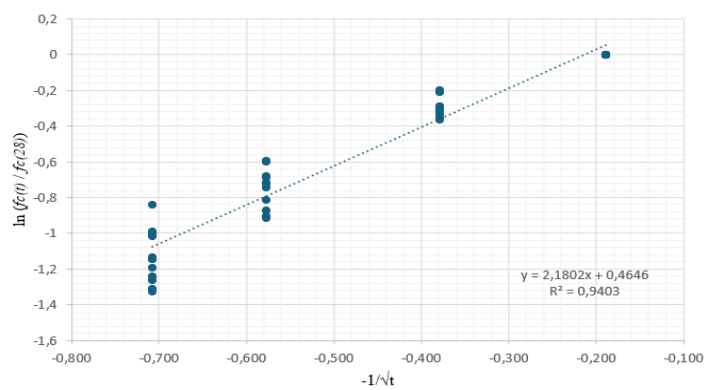


Figura K.151 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1969.

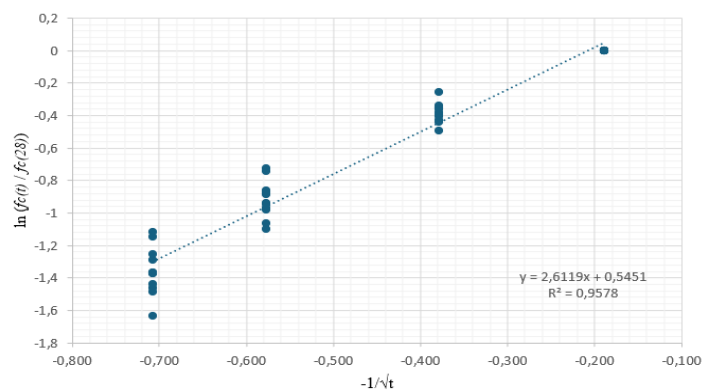


Figura K.152 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1969.

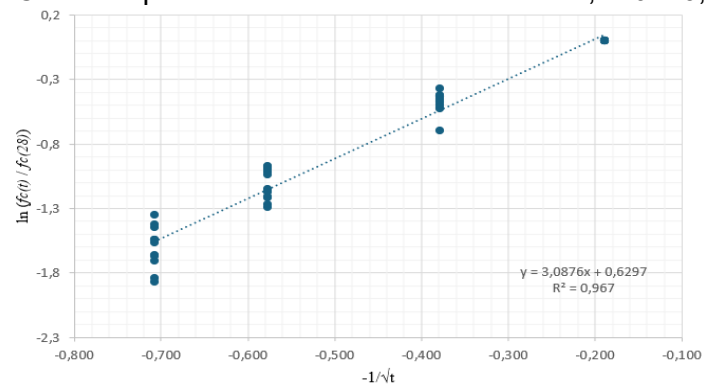


Figura K.153 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1969.

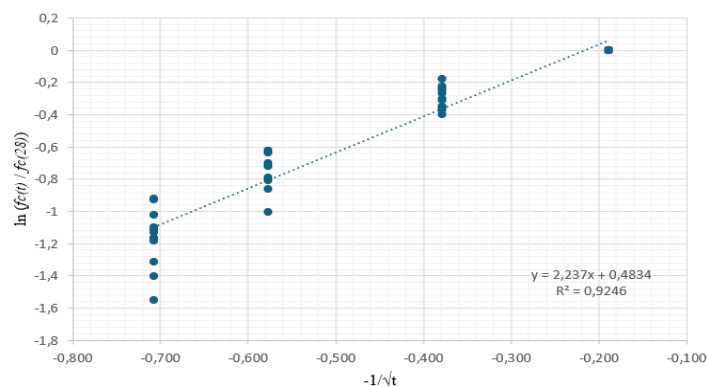


Figura K.154 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1969.

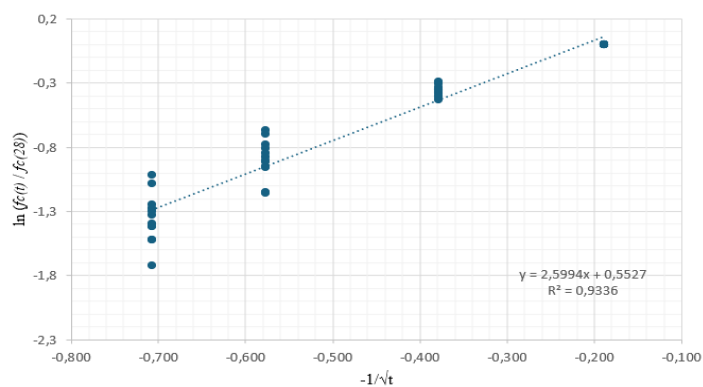


Figura K.155 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1969.

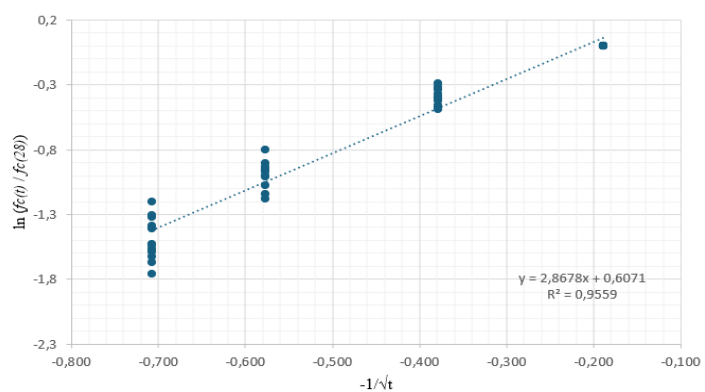


Figura K.156 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1969.

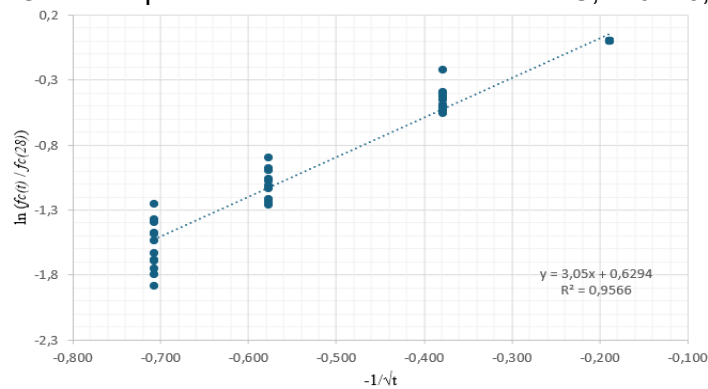


Figura K.157 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1970.

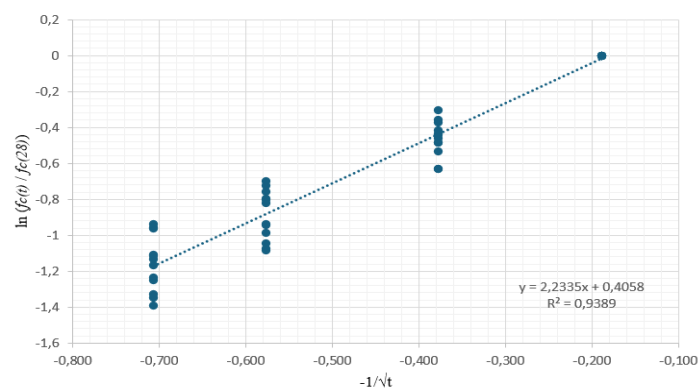


Figura K.158 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1970.

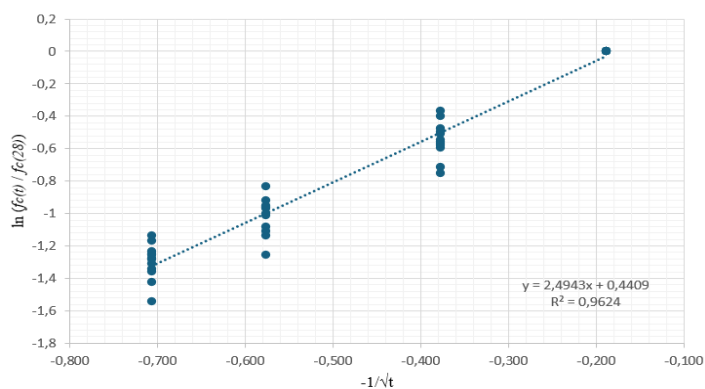


Figura K.159 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1970.

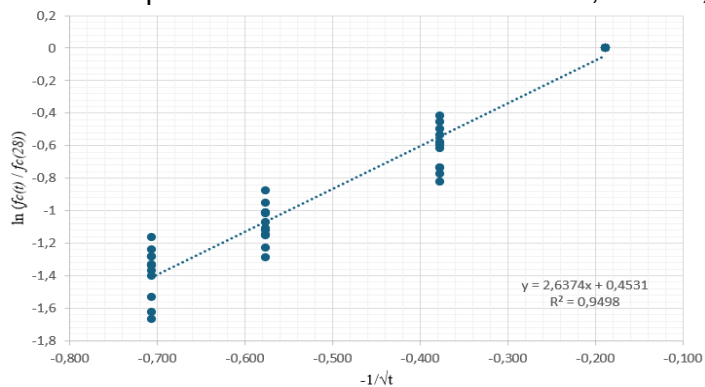


Figura K.160 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1970.

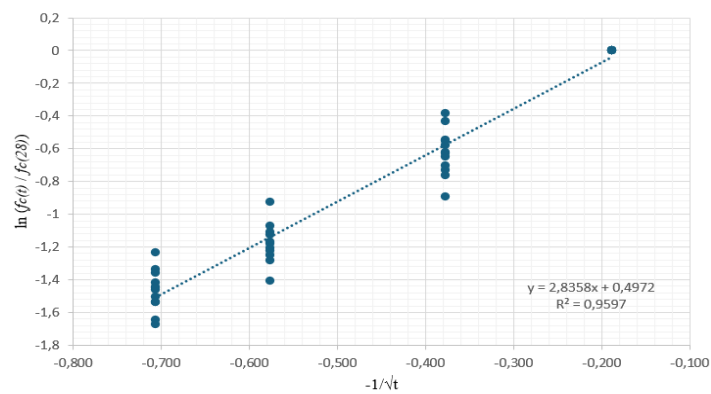


Figura K.161 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1970.

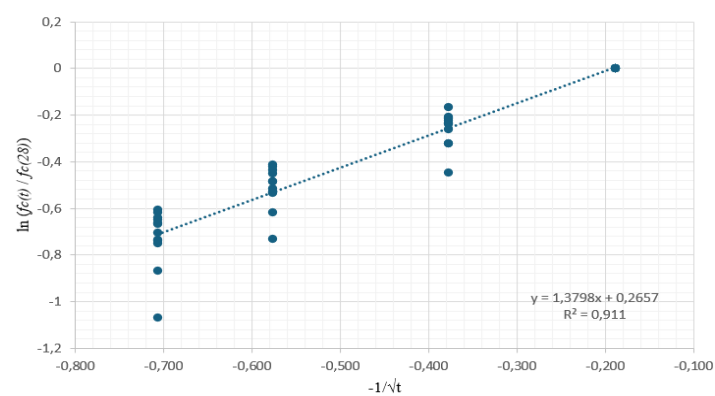


Figura K.162 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1970.

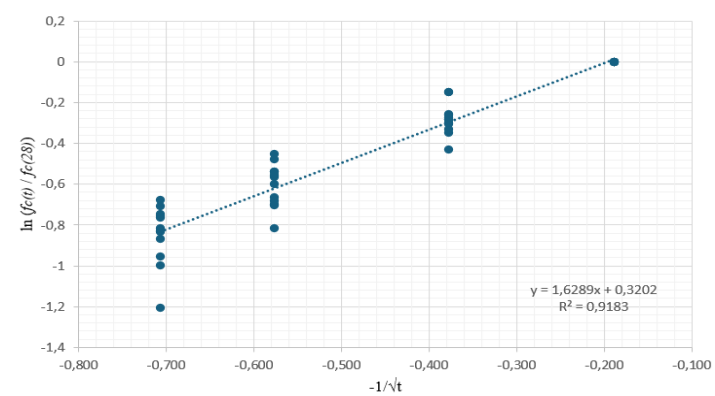


Figura K.163 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1970.

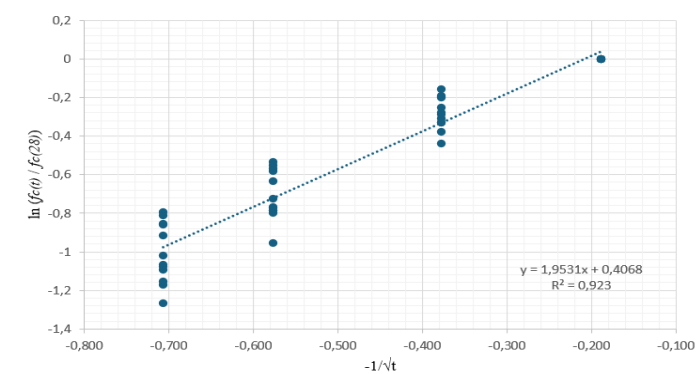


Figura K.164 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1970.

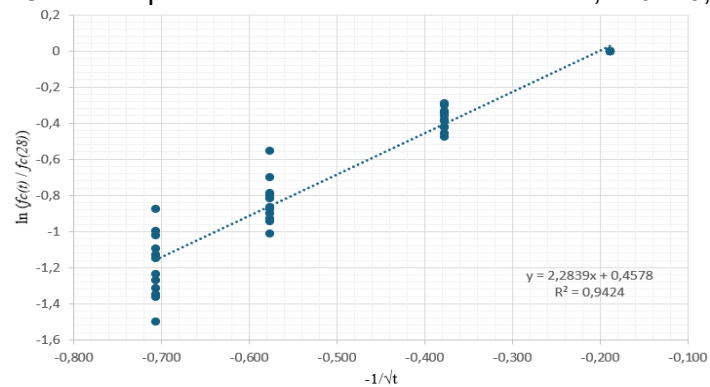


Figura K.165 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1970.

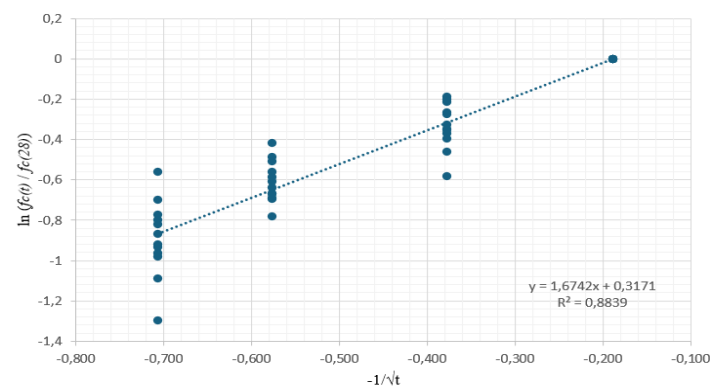


Figura K.166 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1970.

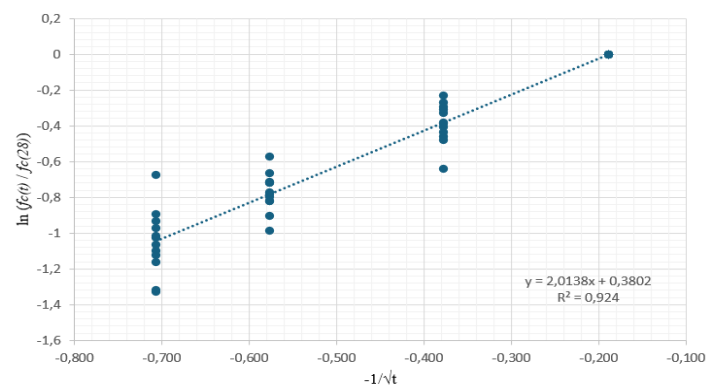


Figura K.167 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1970.

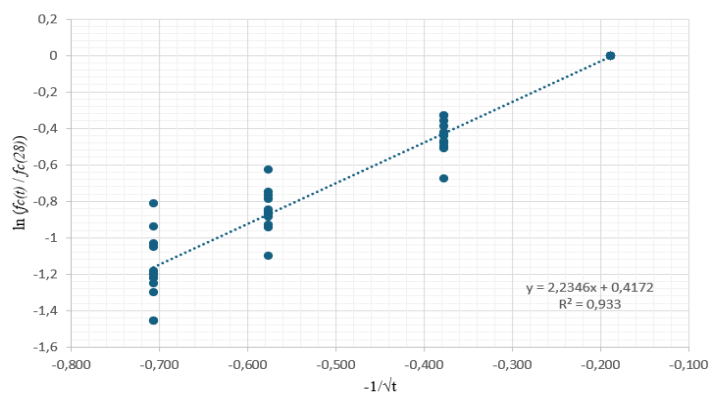


Figura K.168 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1970.

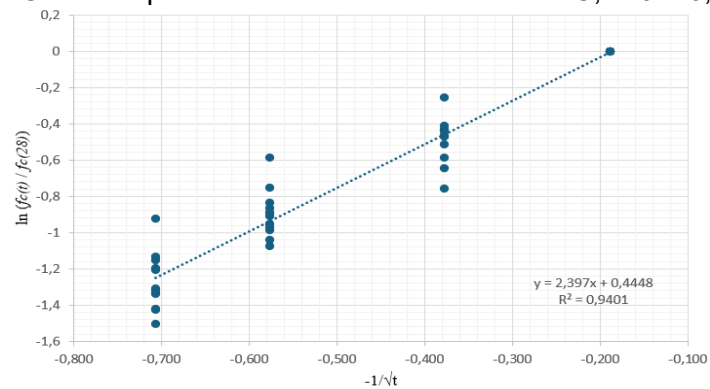


Figura K.169 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1971.

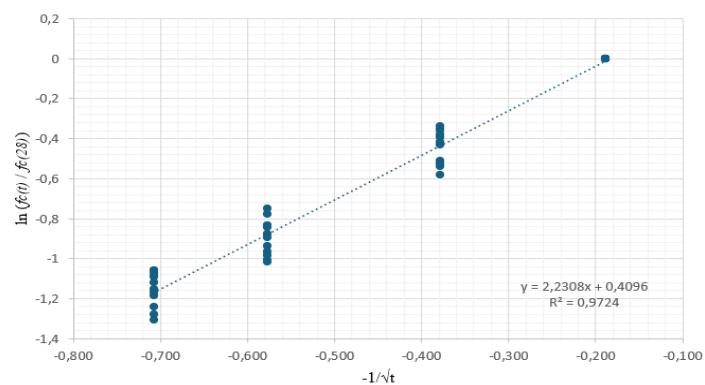


Figura K.170 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1971.

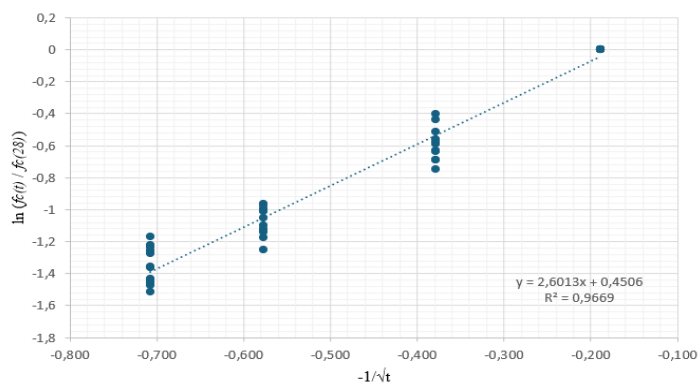


Figura K.171 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1971.

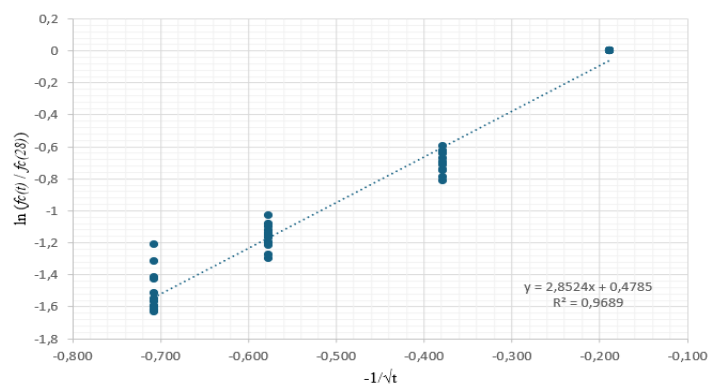


Figura K.172 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1971.

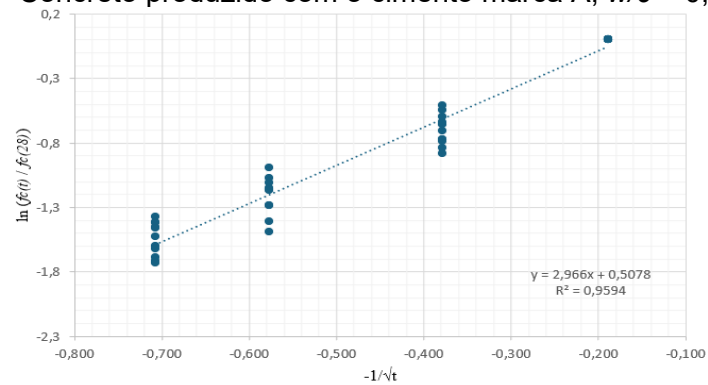


Figura K.173 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1971.

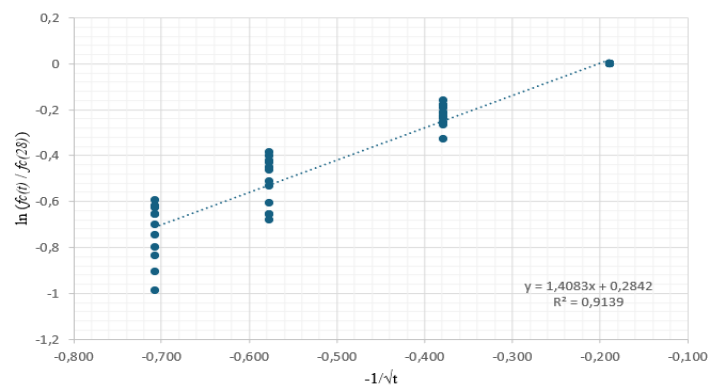


Figura K.174 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1971.

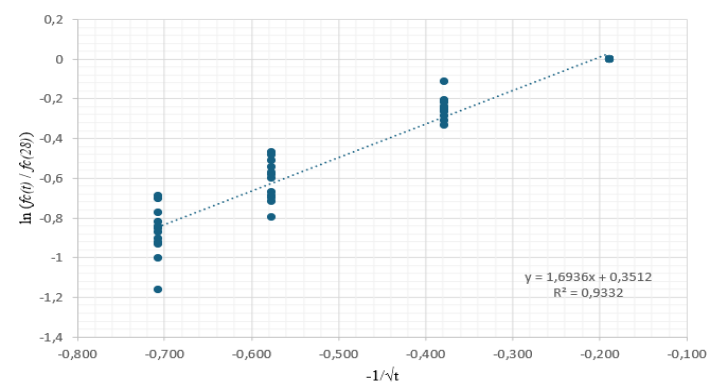


Figura K.175 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1971.

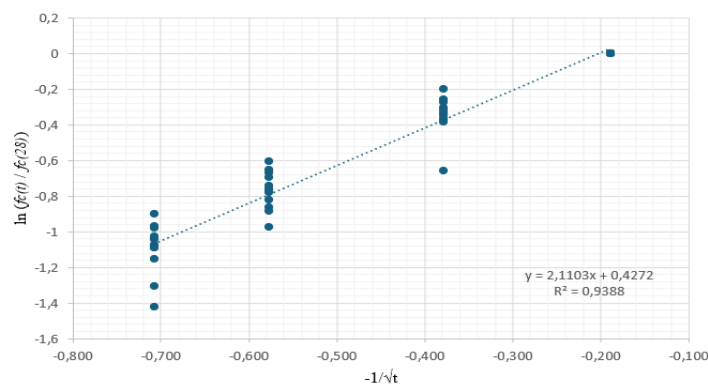


Figura K.176 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1971.

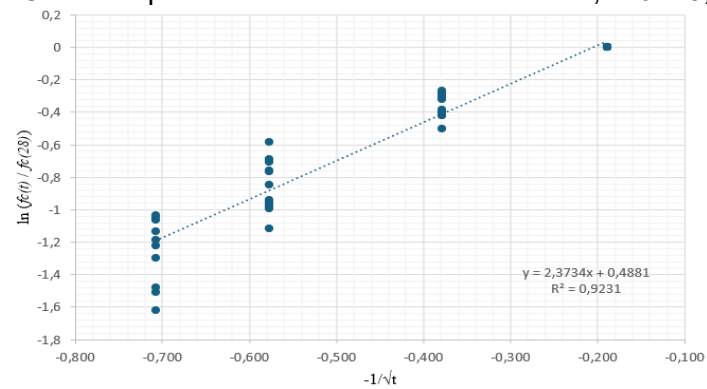


Figura K.177 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1971.

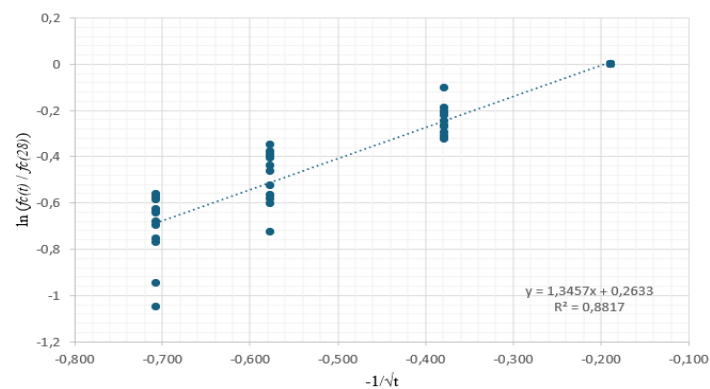


Figura K.178 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1971.

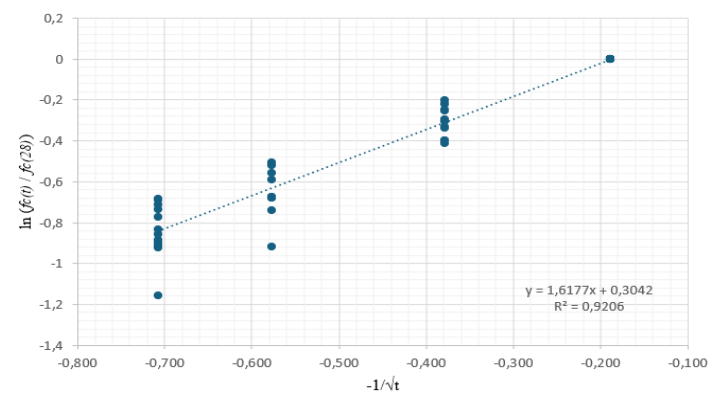


Figura K.179 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1971.

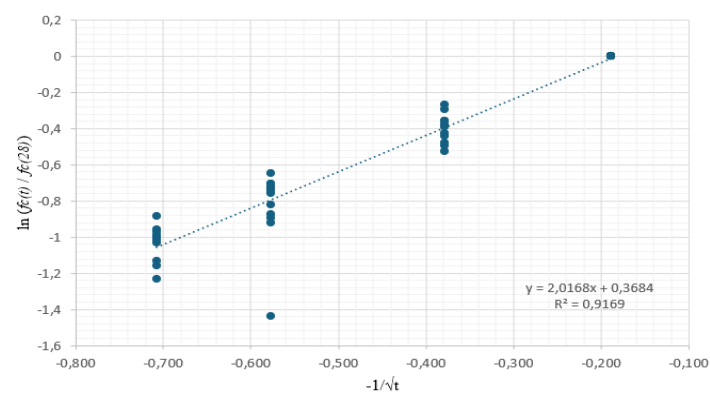


Figura K.180 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1971.

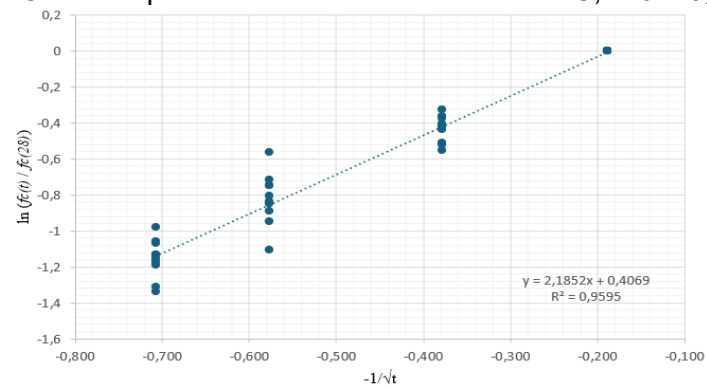


Figura K.181 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1972.

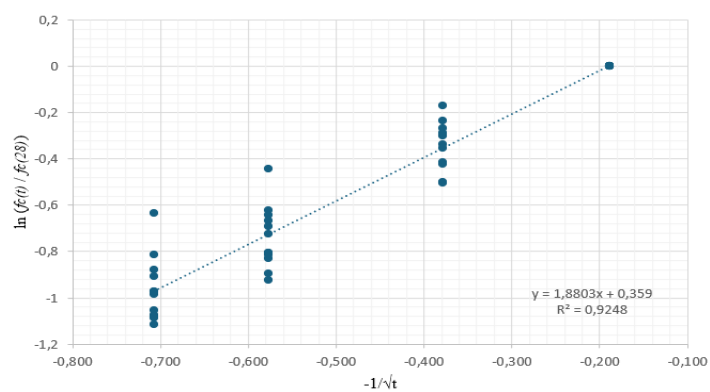


Figura K.182 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1972.

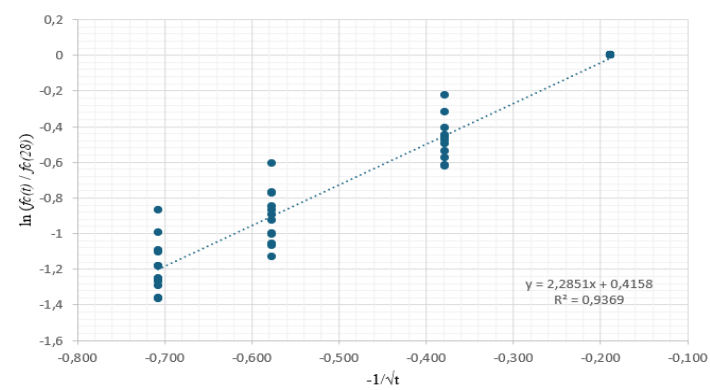


Figura K.183 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1972.

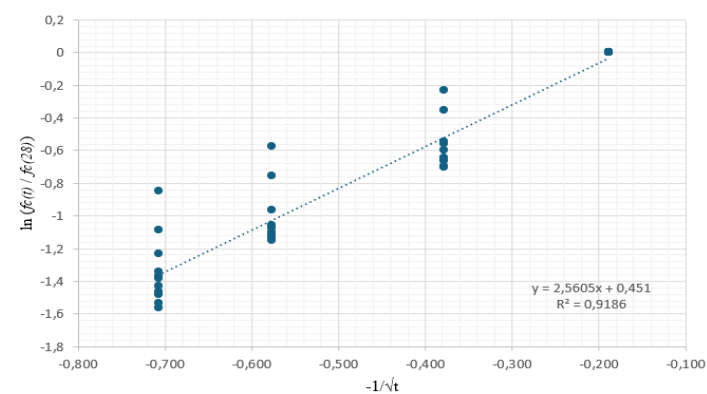


Figura K.184 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1972.

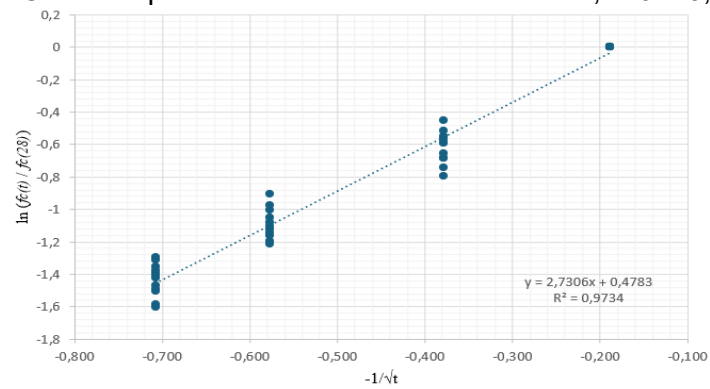


Figura K.185 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1972.

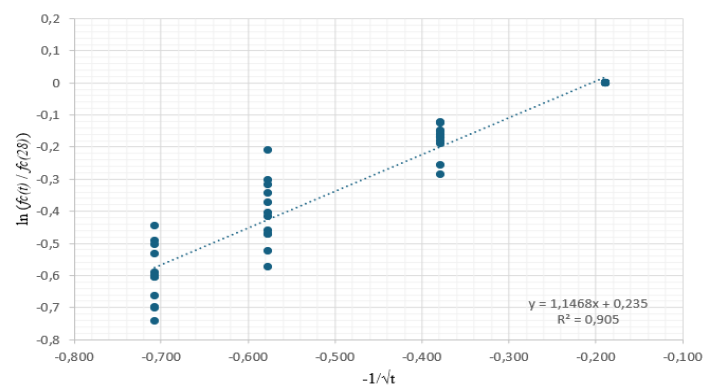


Figura K.186 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1972.

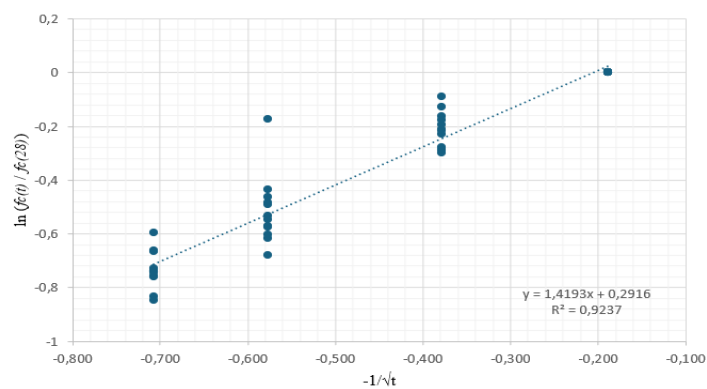


Figura K.187 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1972.

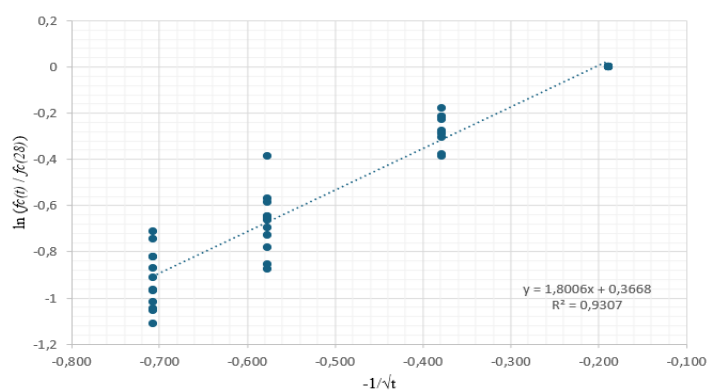


Figura K.188 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1972.

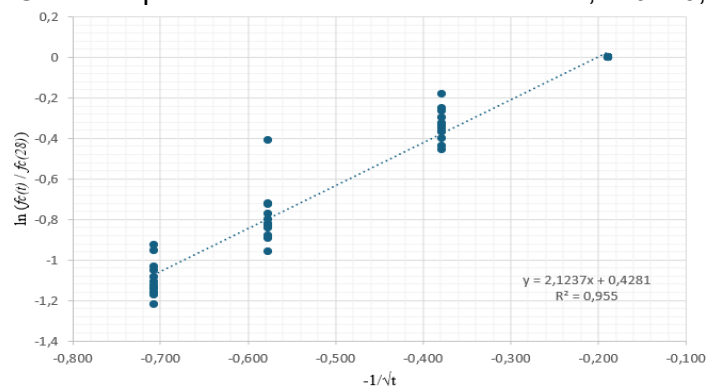


Figura K.189 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1972.

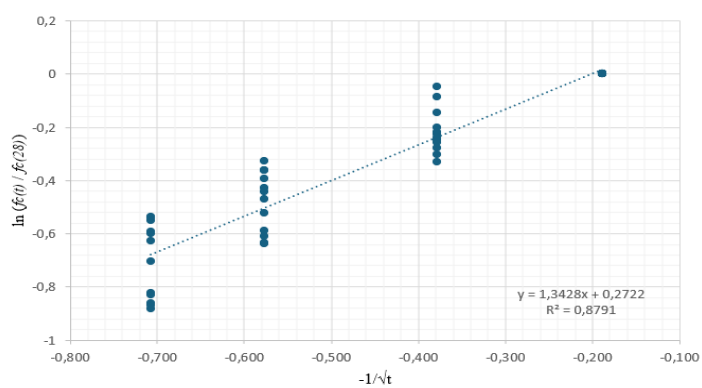


Figura K.190 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1972.

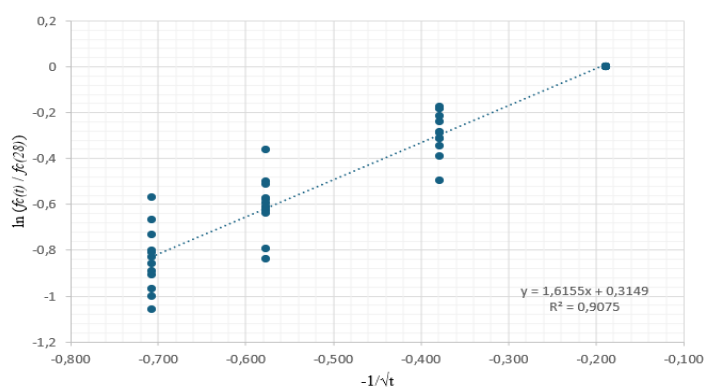


Figura K.191 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1972.

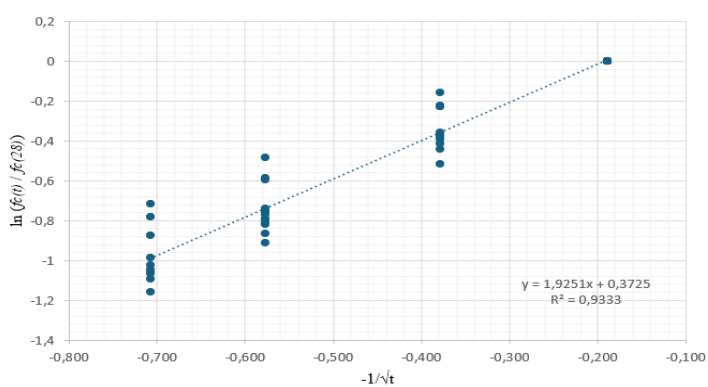


Figura K.192 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1972.

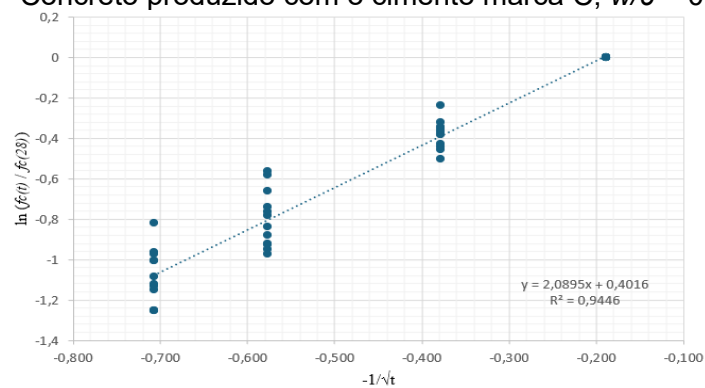


Figura K.193 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1973.

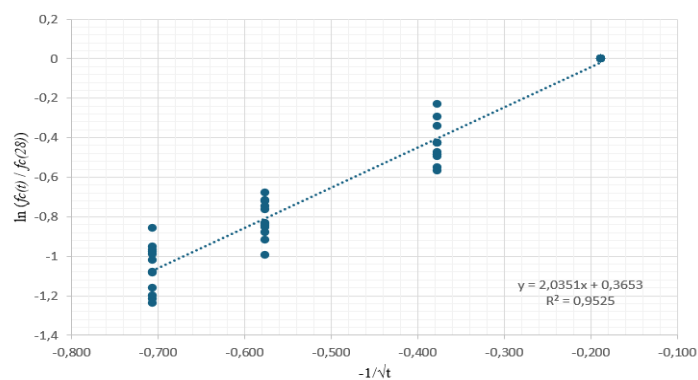


Figura K.194 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1973.

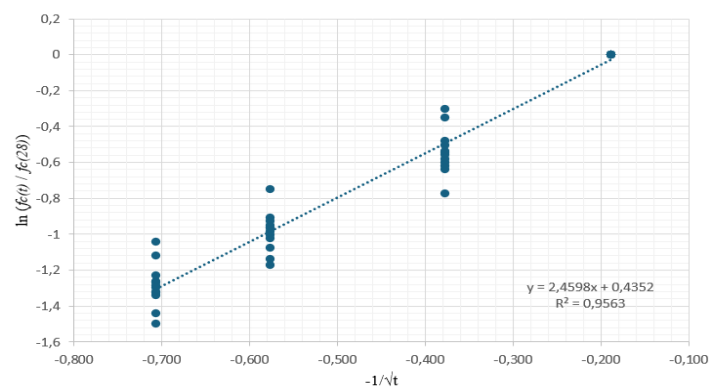


Figura K.195 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1973.

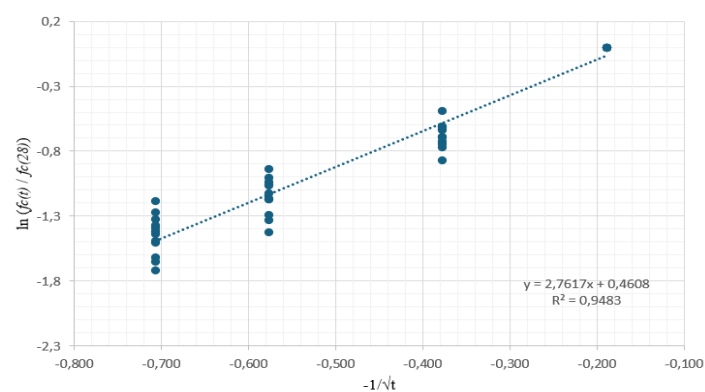


Figura K.196 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1973.

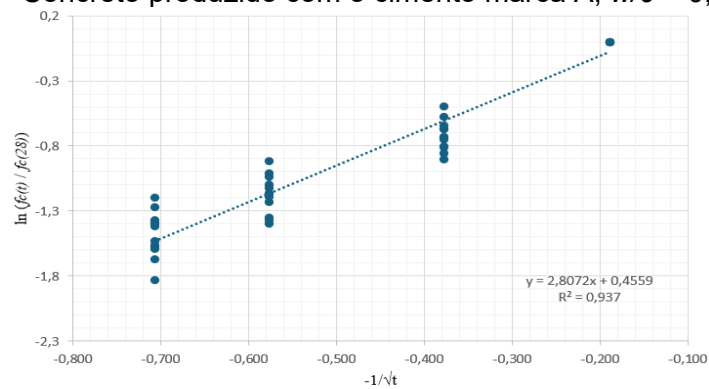


Figura K.197 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1973.

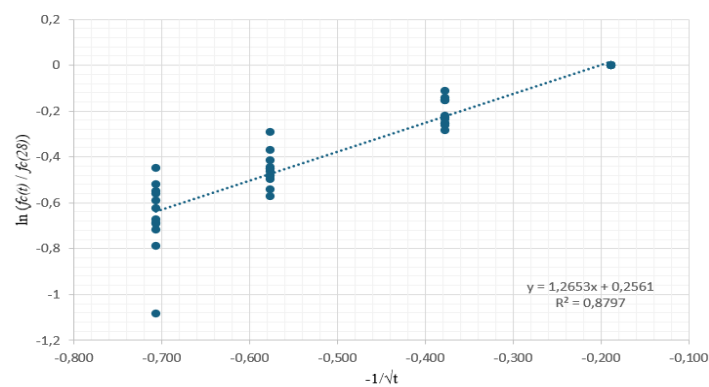


Figura K.198 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1973.

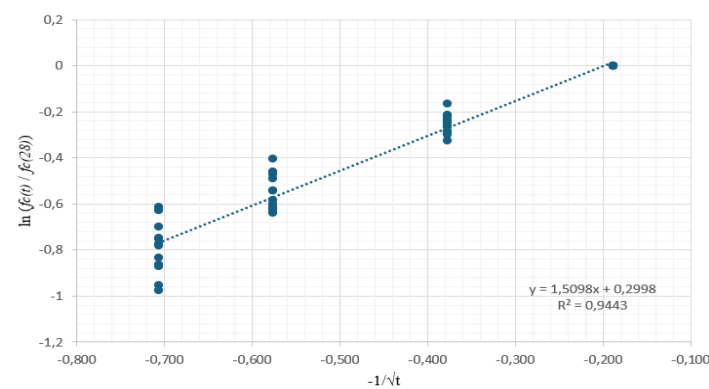


Figura K.199 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1973.

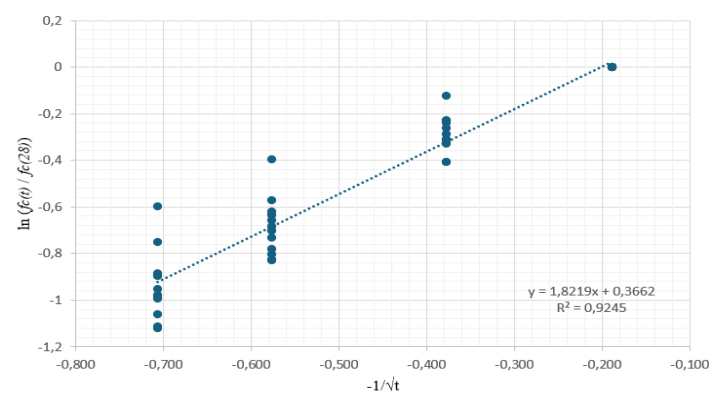


Figura K.200 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1973.

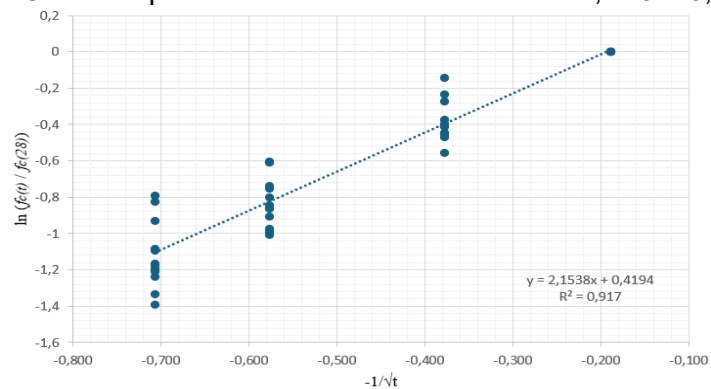


Figura K.201 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1973.

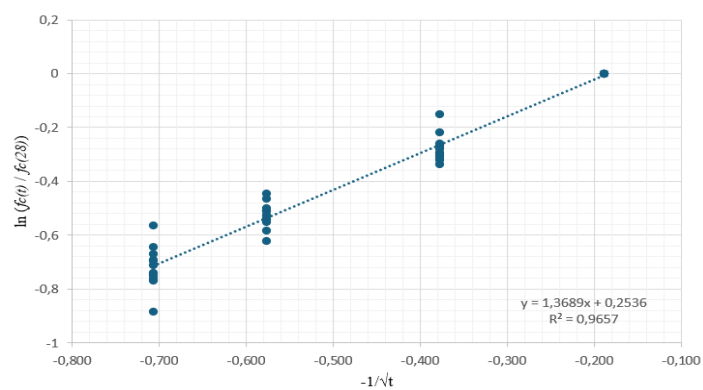


Figura K.202 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1973.

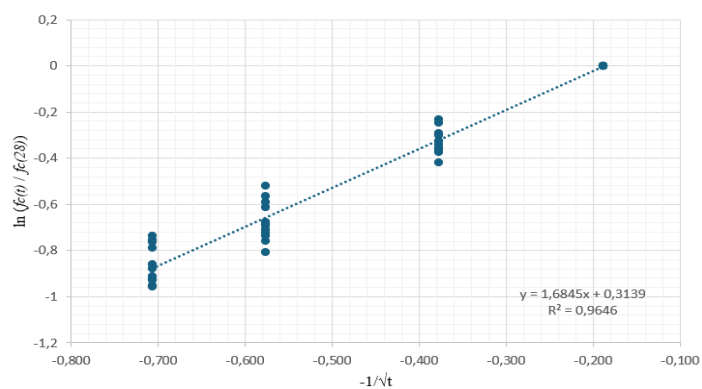


Figura K.203 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1973.

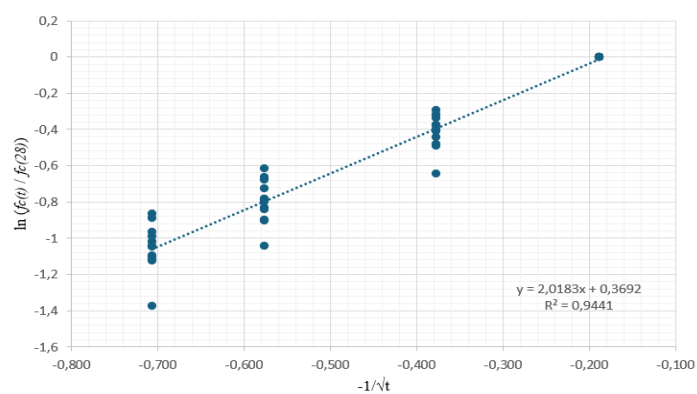


Figura K.204 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1973.

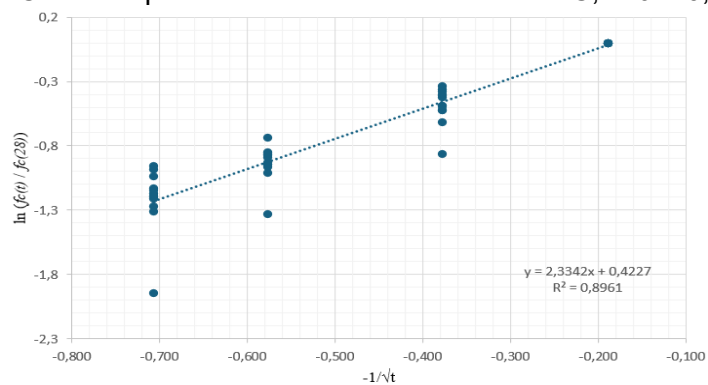


Figura K.205 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1974.

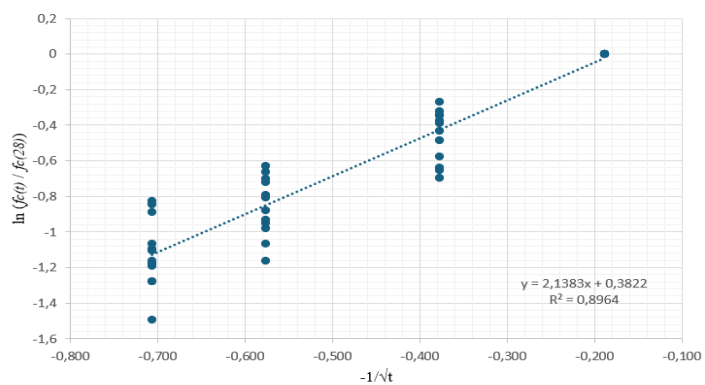


Figura K.206 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1974.

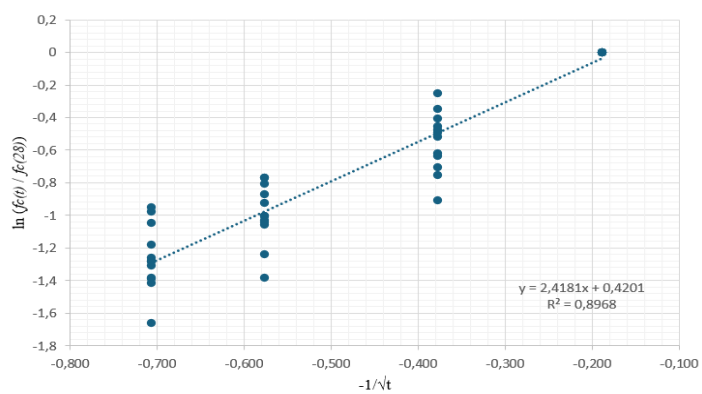


Figura K.207 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1974.

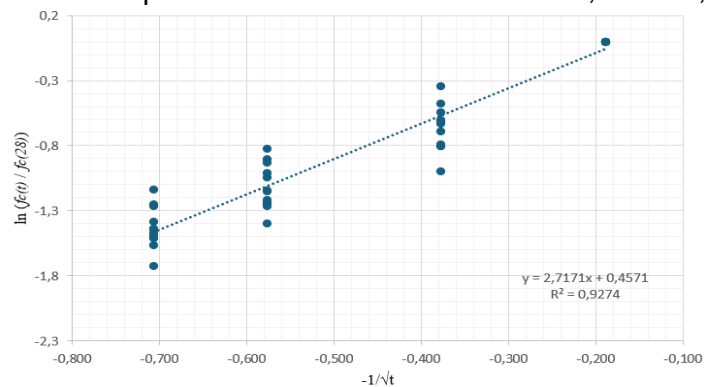


Figura K.208 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1974.

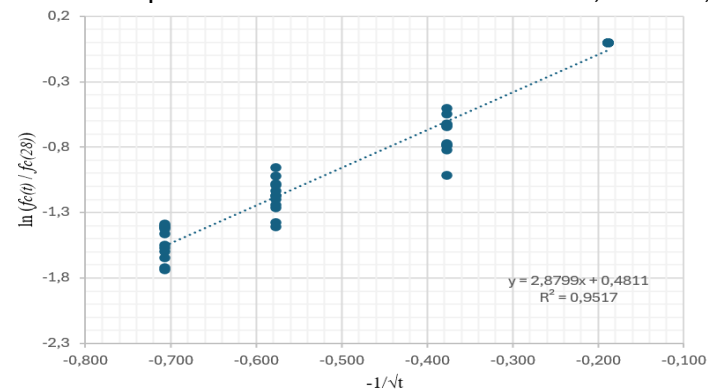


Figura K.209 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1974.

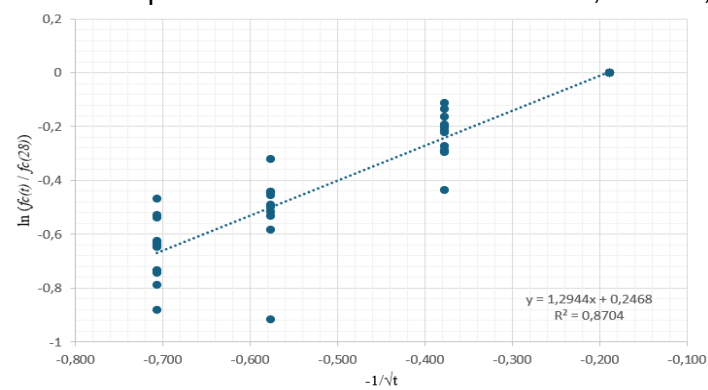


Figura K.210 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1974.

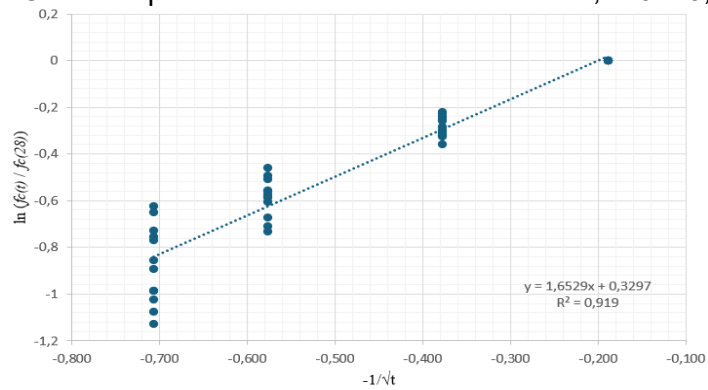


Figura K.211 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1974.

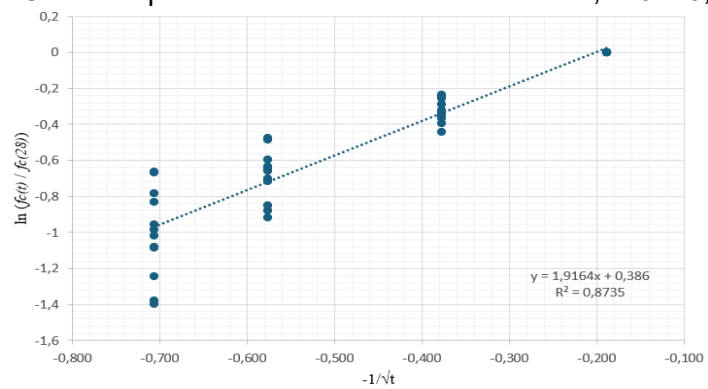


Figura K.212 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1974.

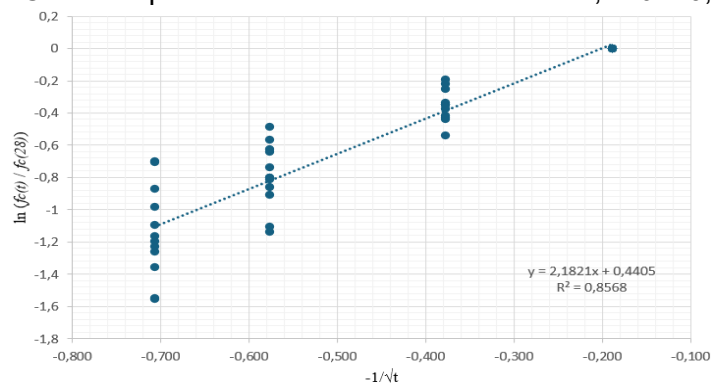


Figura K.213 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1974.

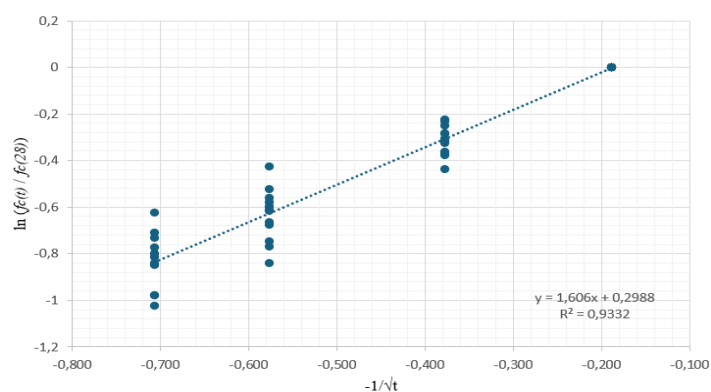


Figura K.214 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1974.

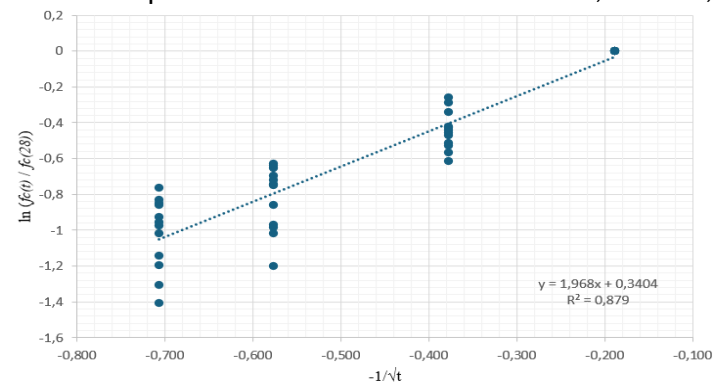


Figura K.215 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1974.

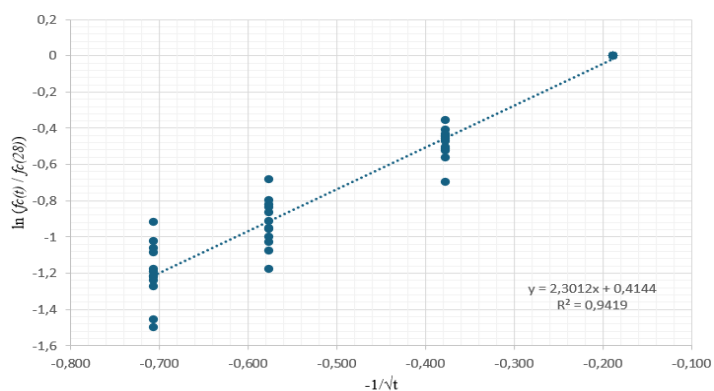


Figura K.216 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1974.

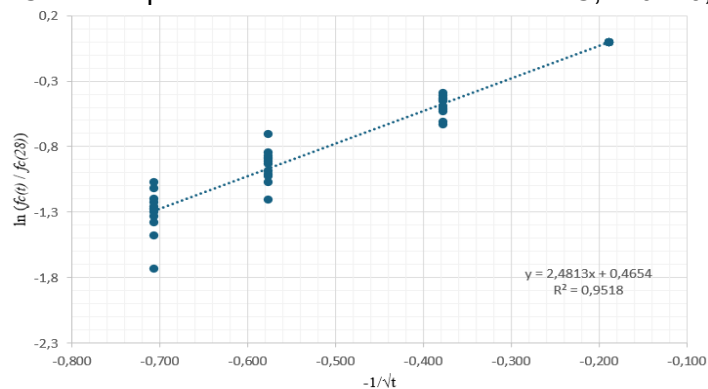


Figura K.217 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1975.

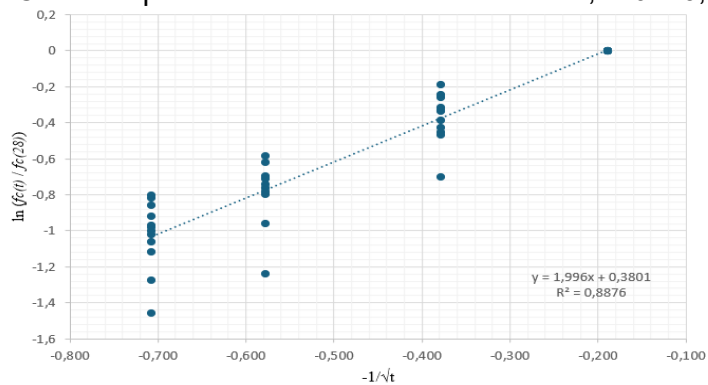


Figura K.218 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1975.

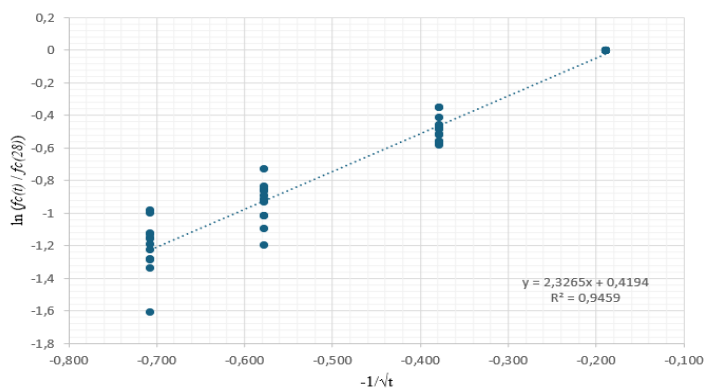


Figura K.219 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1975.

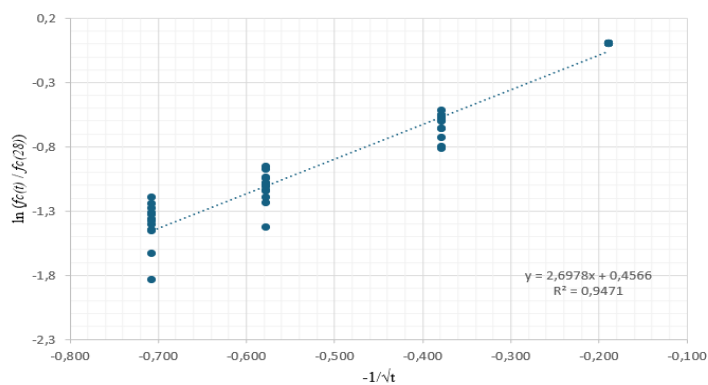


Figura K.220 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1975.

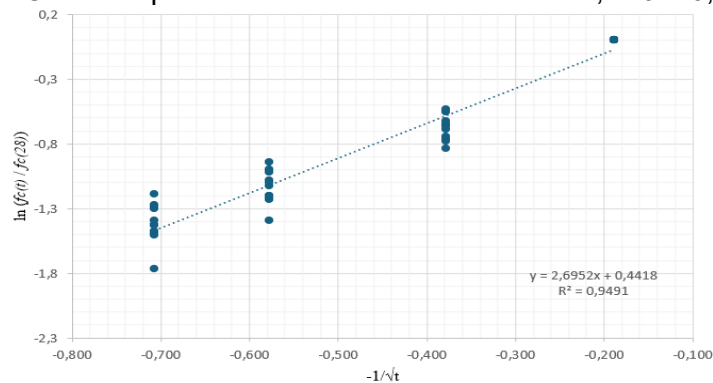


Figura K.221 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1975.

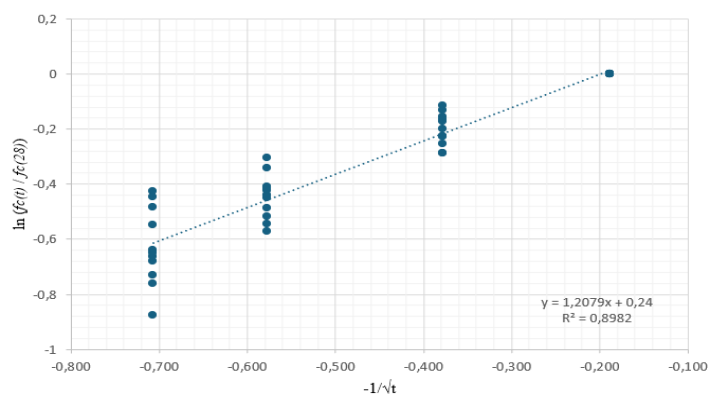


Figura K.222 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1975.

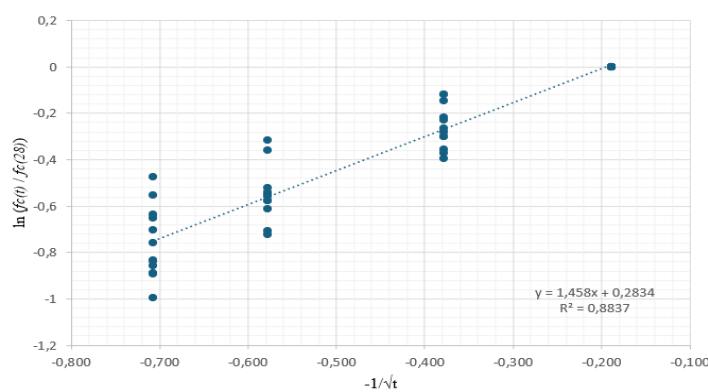


Figura K.223 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1975.

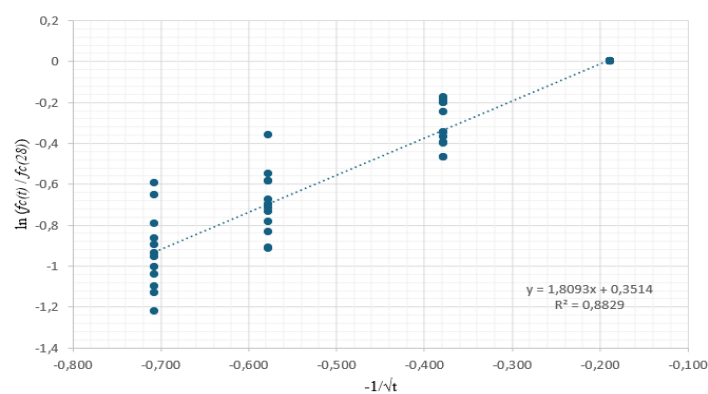


Figura K.224 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1975.

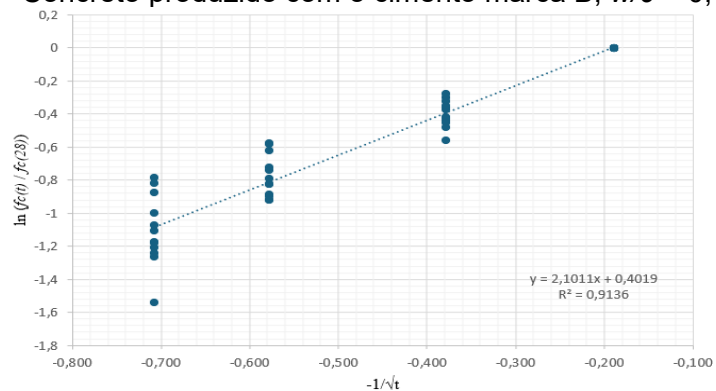


Figura K.225 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1975.

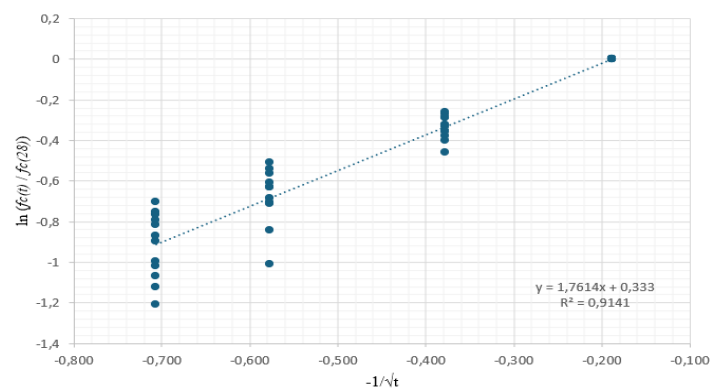


Figura K.226 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1975.

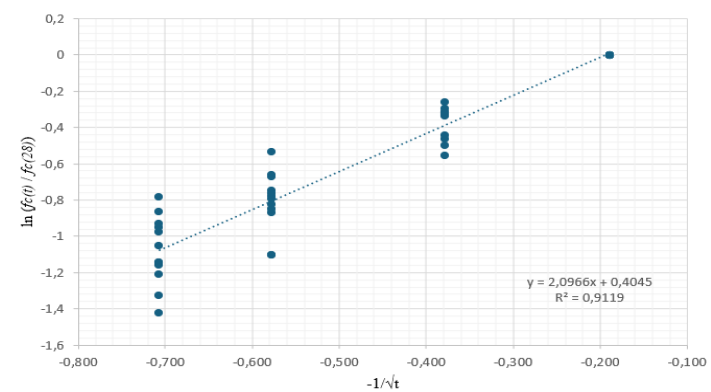


Figura K.227 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1975.

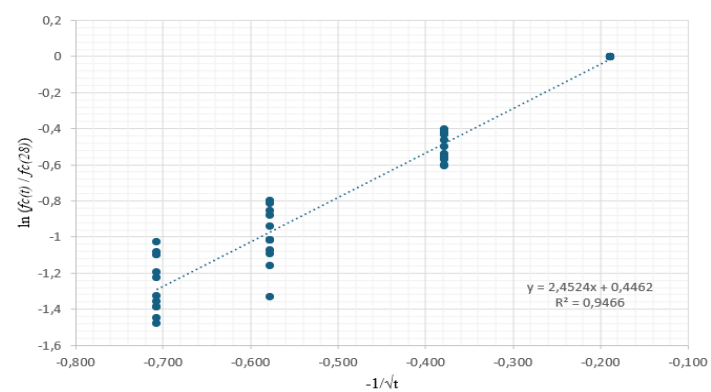


Figura K.228 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1975.

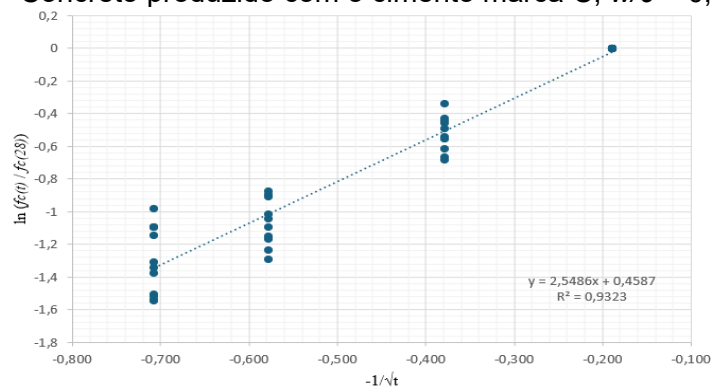


Figura K.229 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1976.

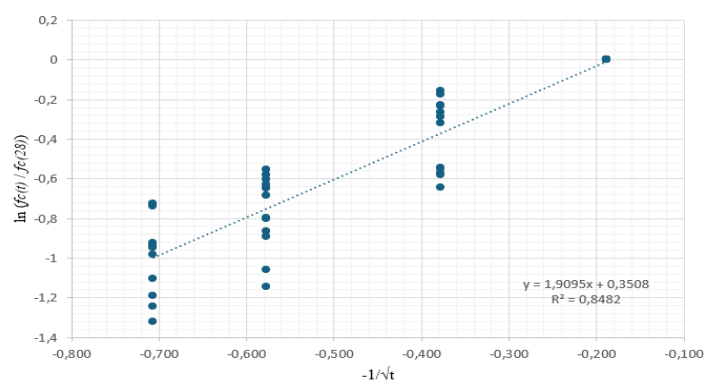


Figura K.230 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1976.

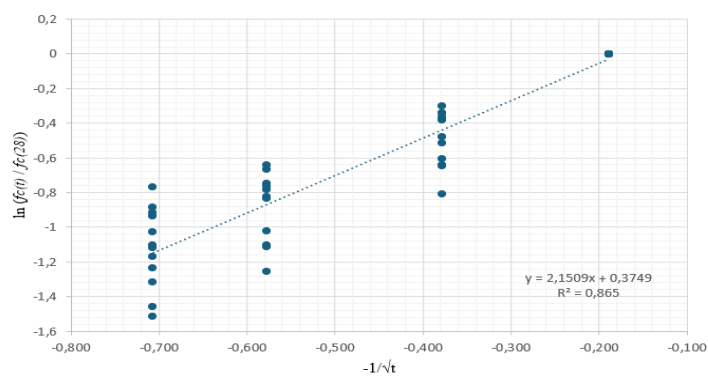


Figura K.231 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1976.

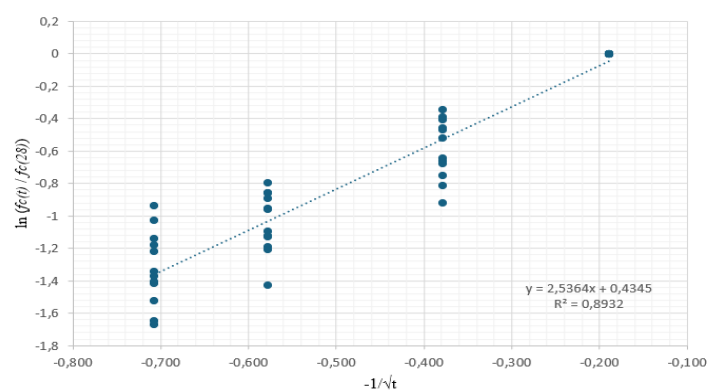


Figura K.232 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1976.

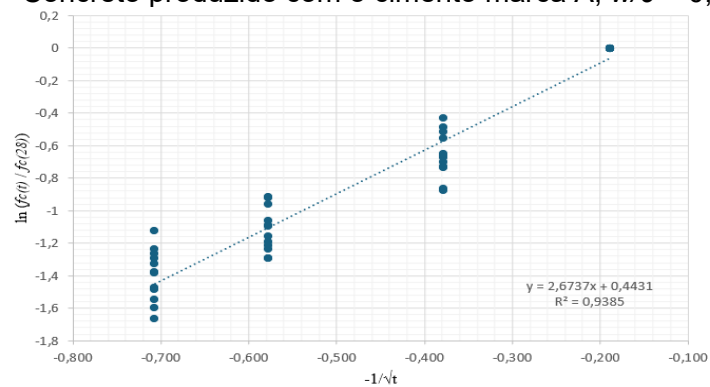


Figura K.233 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1976.

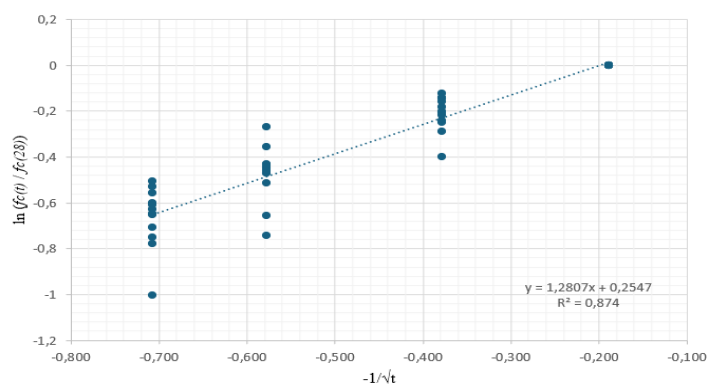


Figura K.234 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1976.

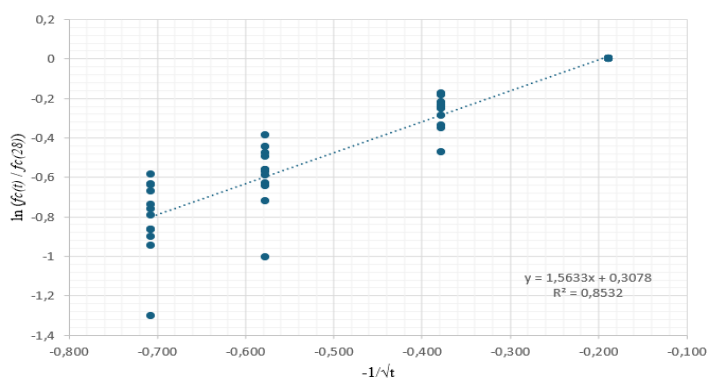


Figura K.235 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1976.

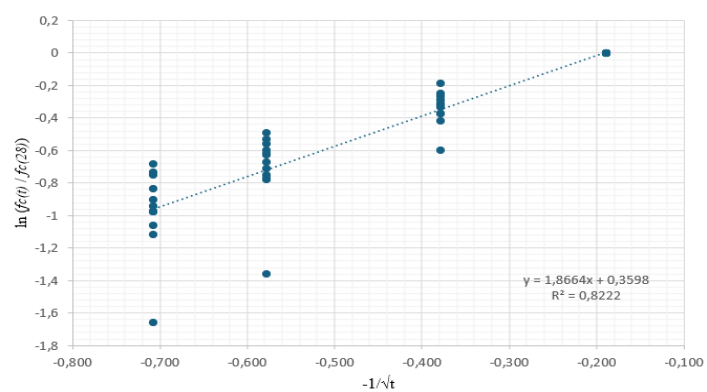


Figura K.236 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1976.

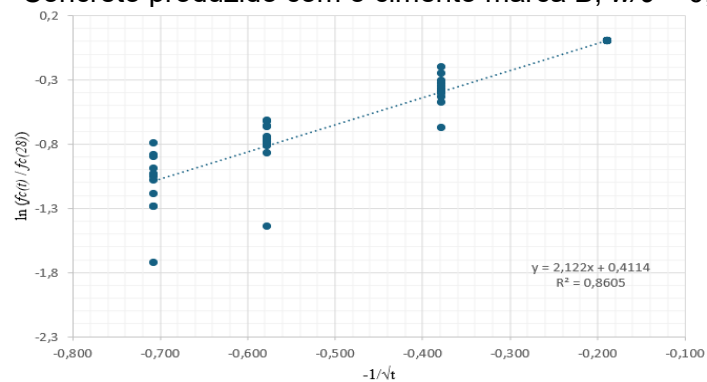


Figura K.237 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1976.

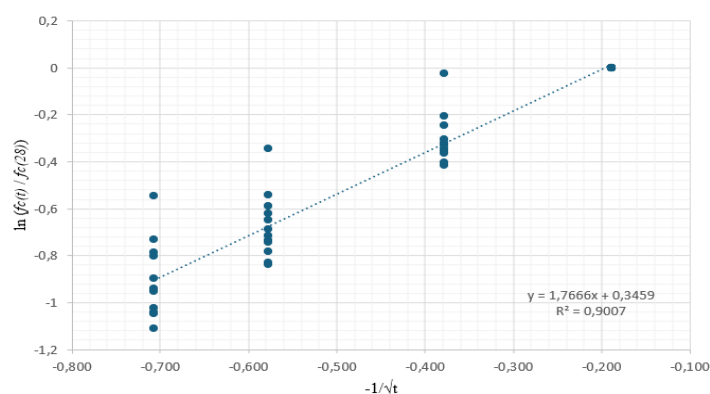


Figura K.238 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1976.

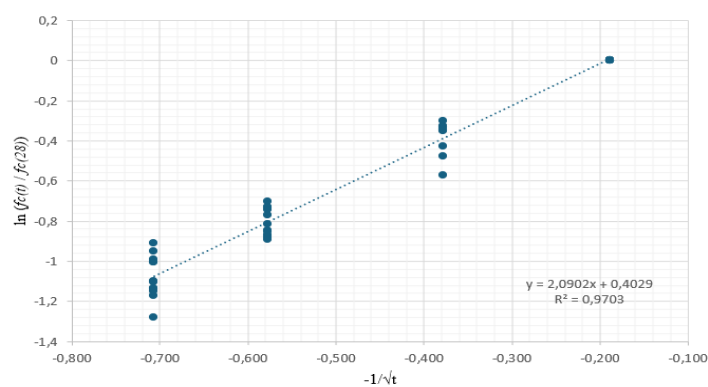


Figura K.239 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1976.

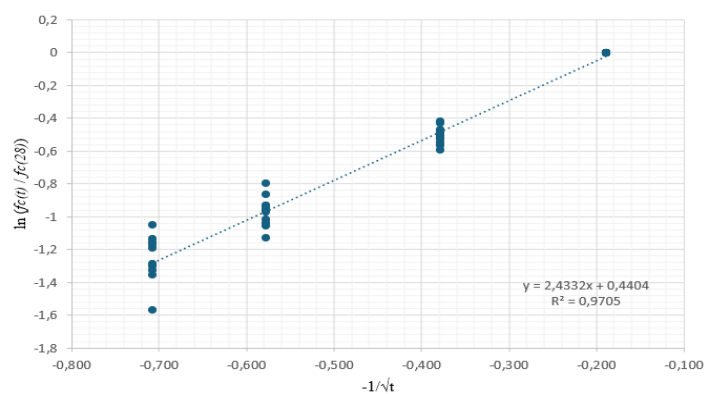


Figura K.240 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1976.

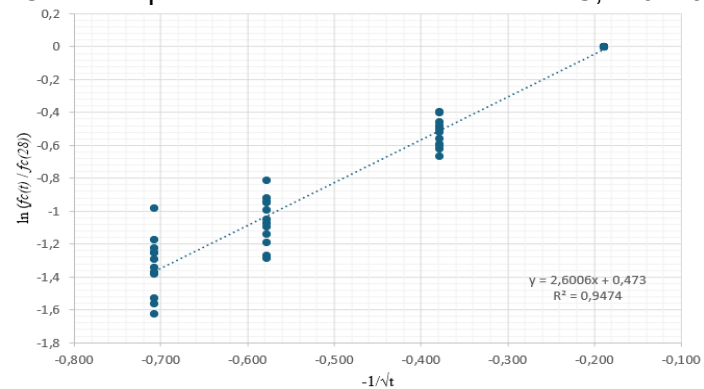


Figura K.241 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1977.

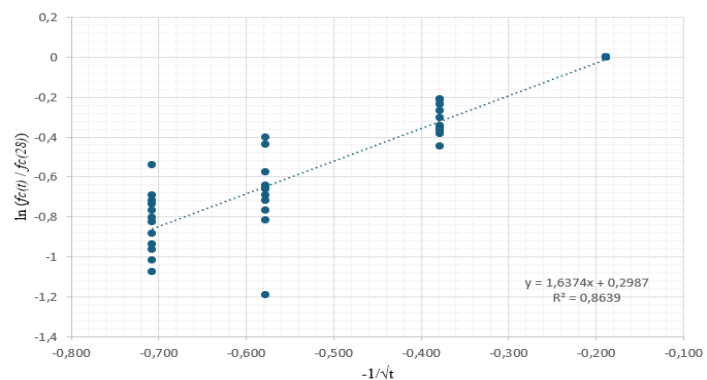


Figura K.242 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1977.

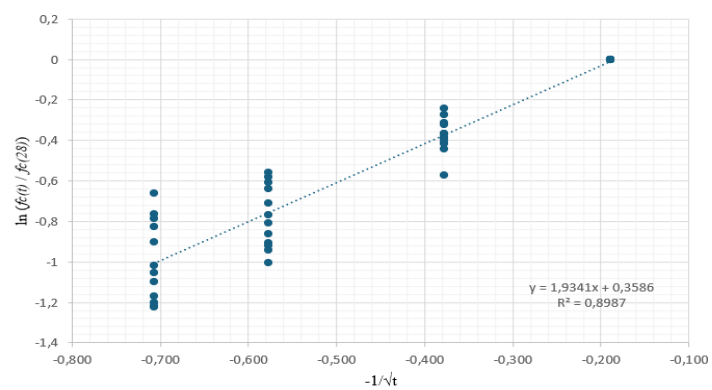


Figura K.243 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1977.

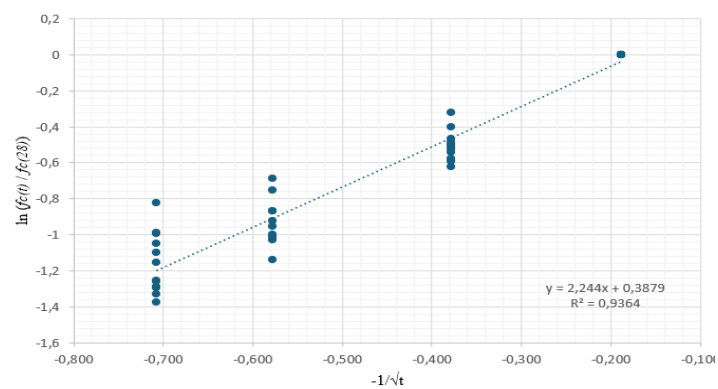


Figura K.244 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1977.

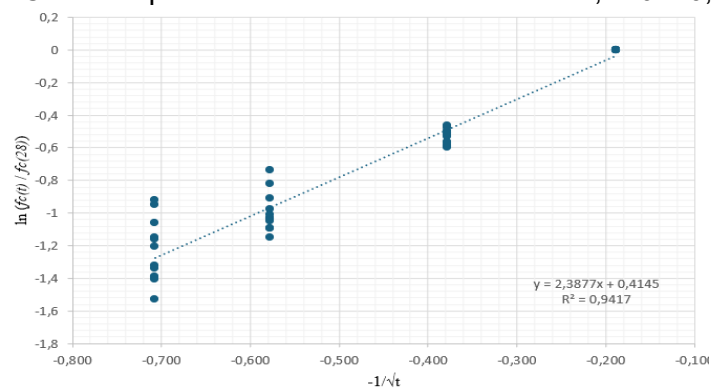


Figura K.245 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1977.

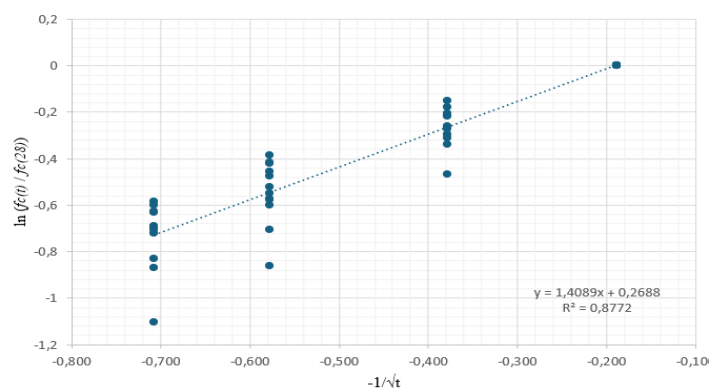


Figura K.246 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1977.

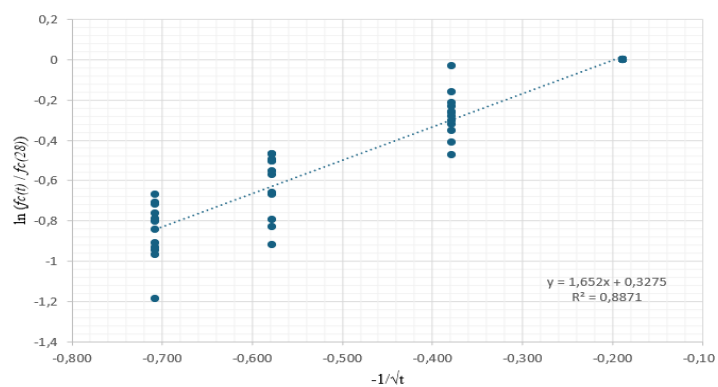


Figura K.247 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1977.

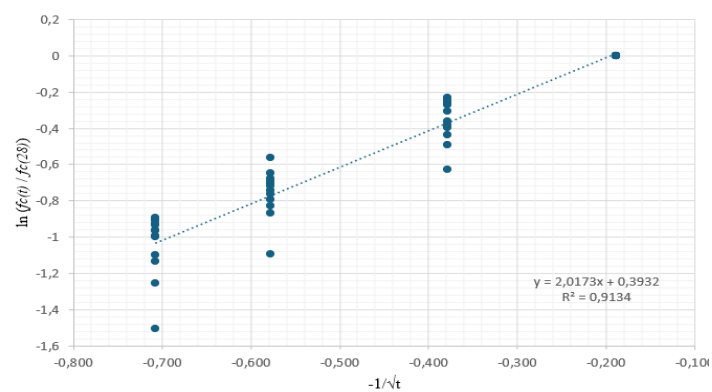


Figura K.248 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1977.

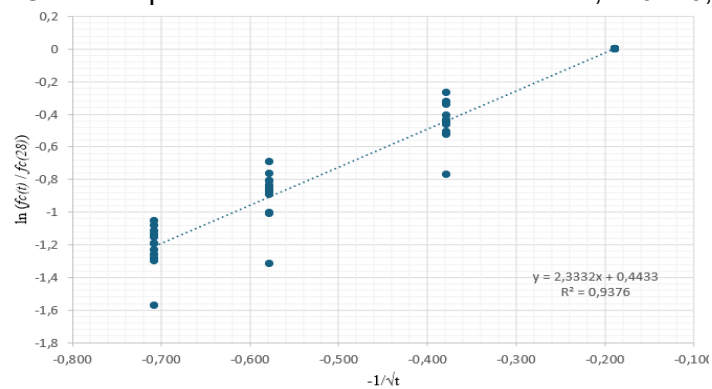


Figura K.249 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1977.

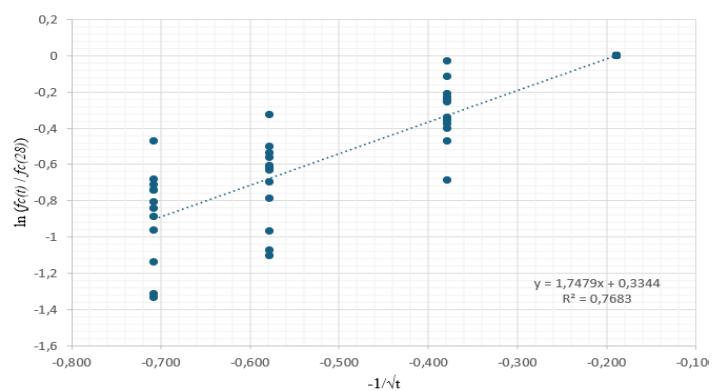


Figura K.250 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1977.

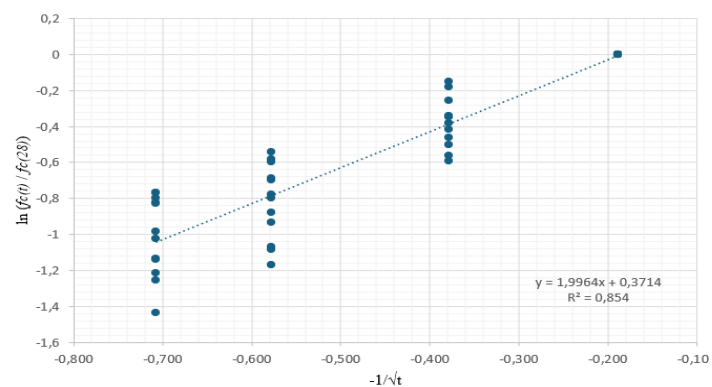


Figura K.251 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1977.

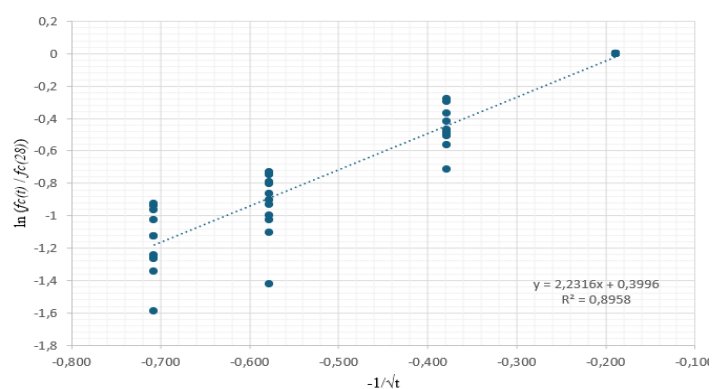


Figura K.252 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1977.

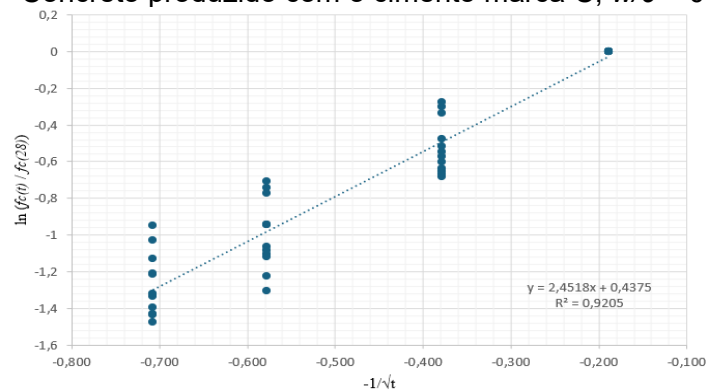


Figura K.253 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1978.

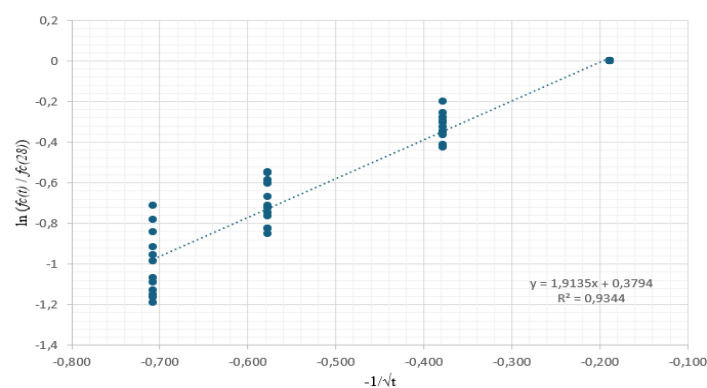


Figura K.254 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1978.

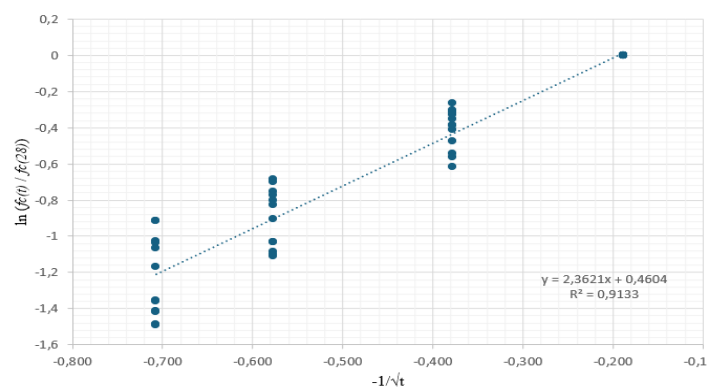


Figura K.255 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1978.

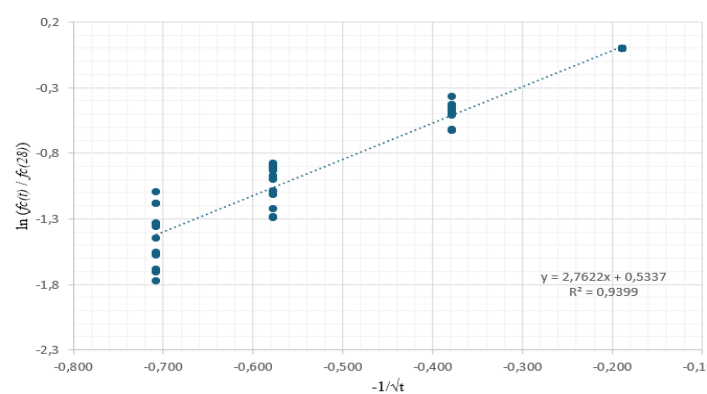


Figura K.256 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1978.

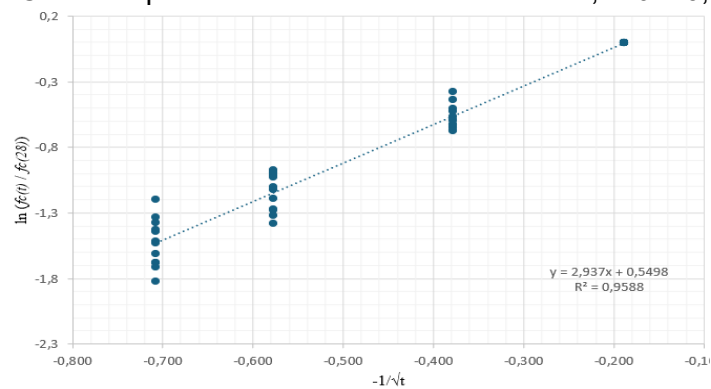


Figura K.257 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1978.

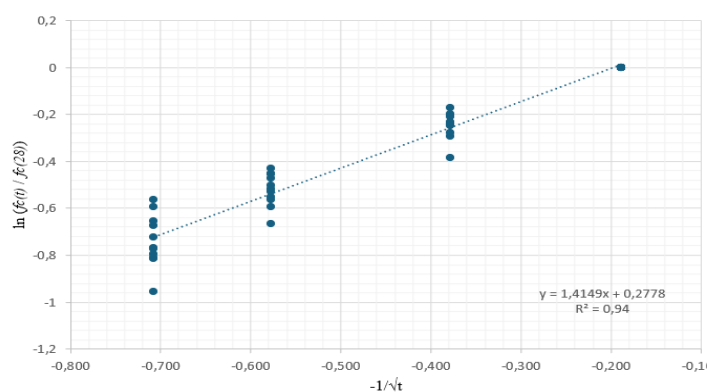


Figura K.258 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1978.

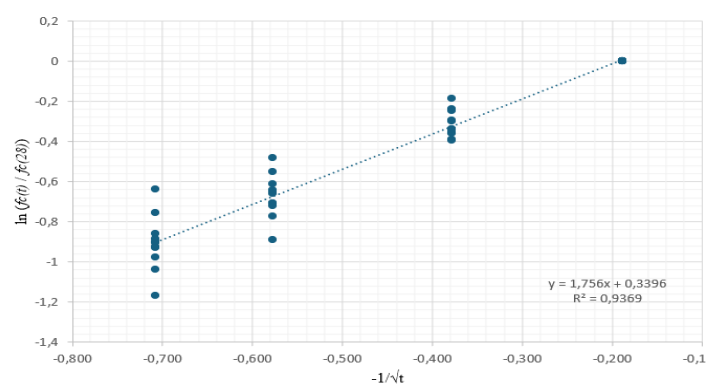


Figura K.259 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1978.

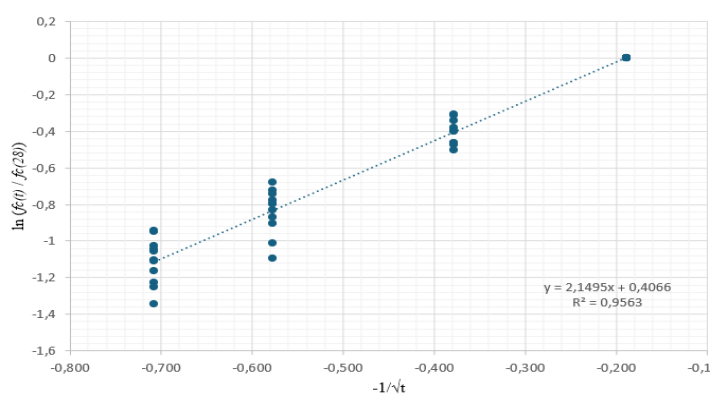


Figura K.260 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1978.

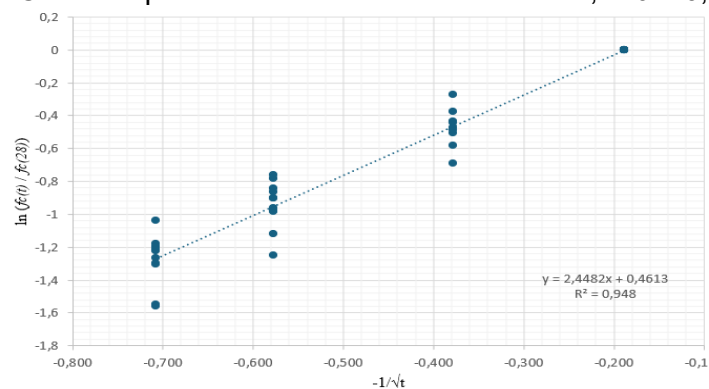


Figura K.261 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1978.

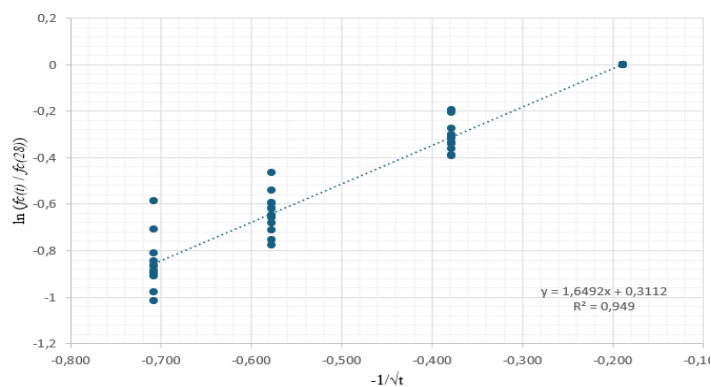


Figura K.262 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1978.

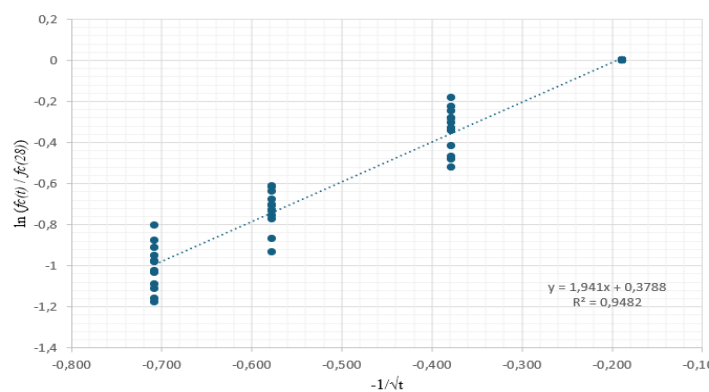


Figura K.263 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1978.

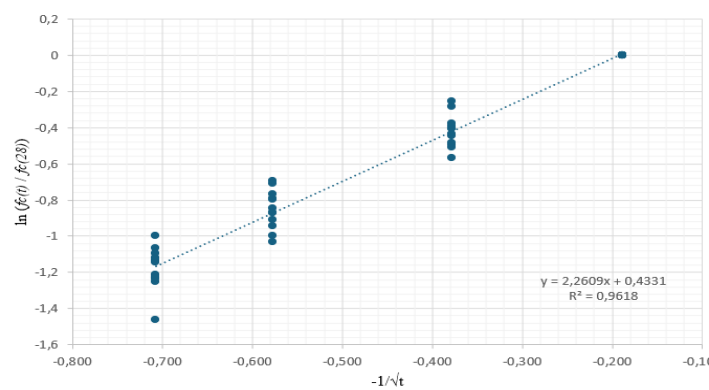


Figura K.264 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1978.

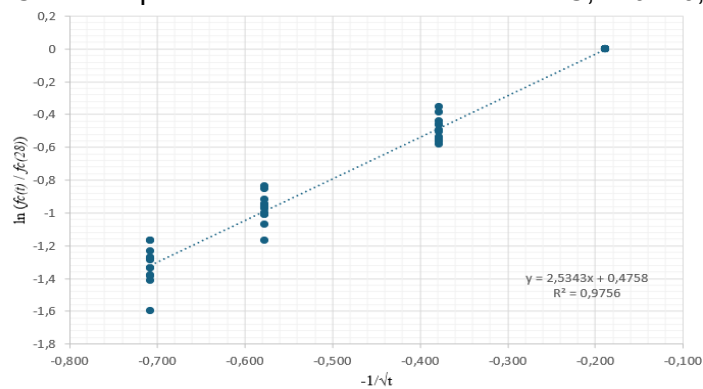


Figura K.265 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,45$. Ano: 1979.

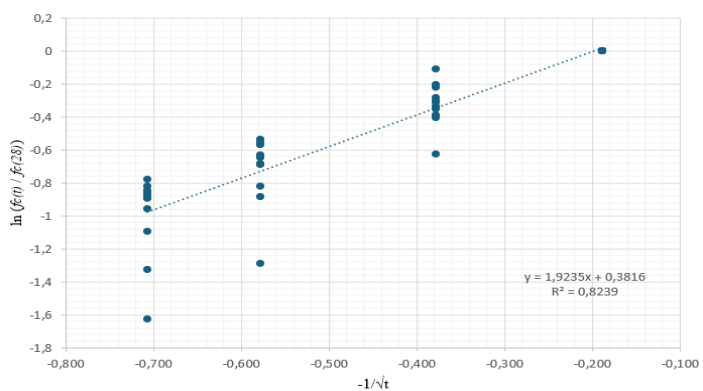


Figura K.266 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,55$. Ano: 1979.

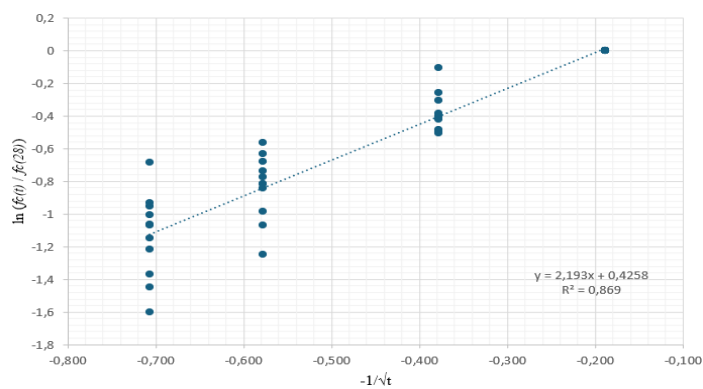


Figura K.267 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,65$. Ano: 1979.

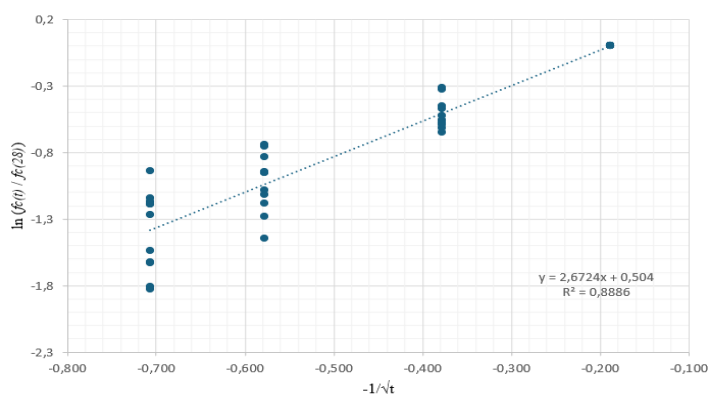


Figura K.268 – Concreto produzido com o cimento marca A, $w/c = 0,75$. Ano: 1979.

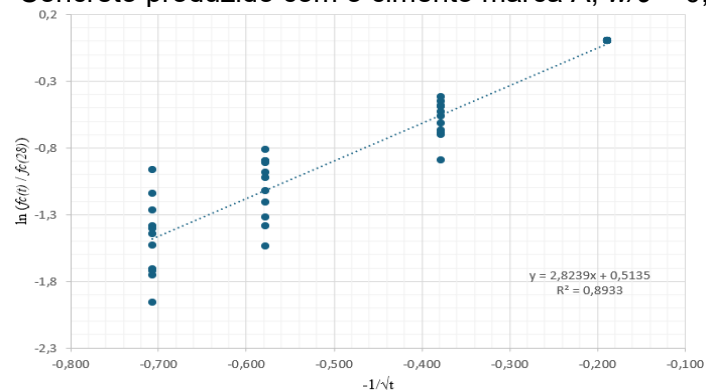


Figura K.269 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,45$. Ano: 1979.

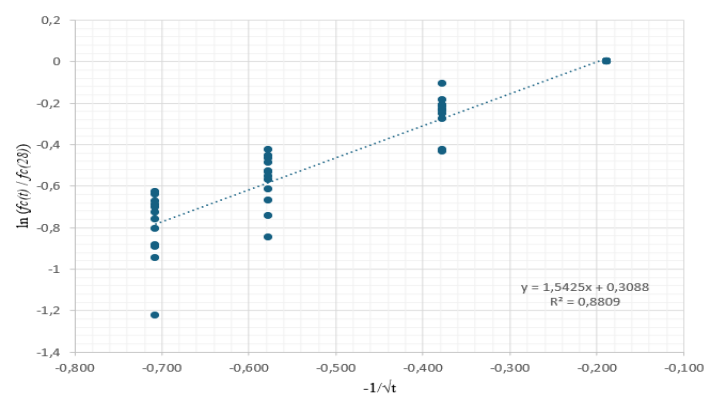


Figura K.270 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,55$. Ano: 1979.

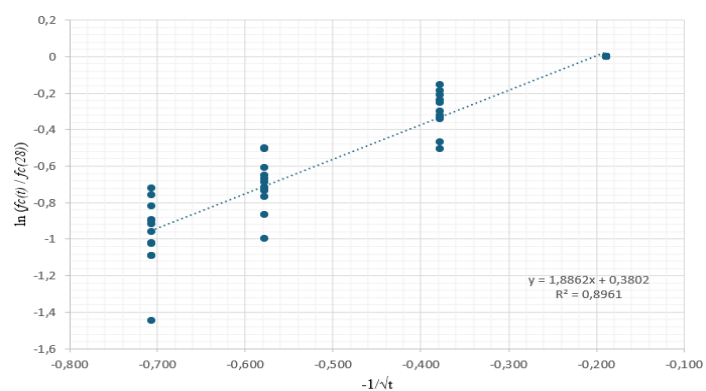


Figura K.271 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,65$. Ano: 1979.

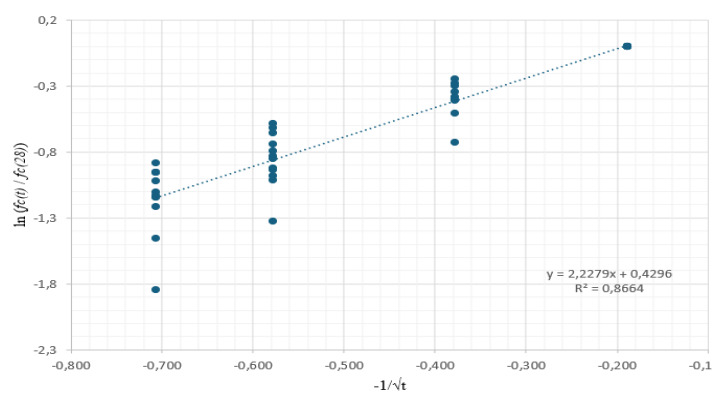


Figura K.272 – Concreto produzido com o cimento marca B, $w/c = 0,75$. Ano: 1979.

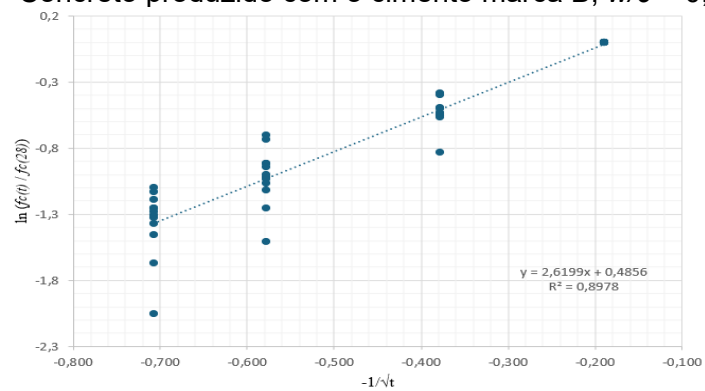


Figura K.273 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,45$. Ano: 1979.

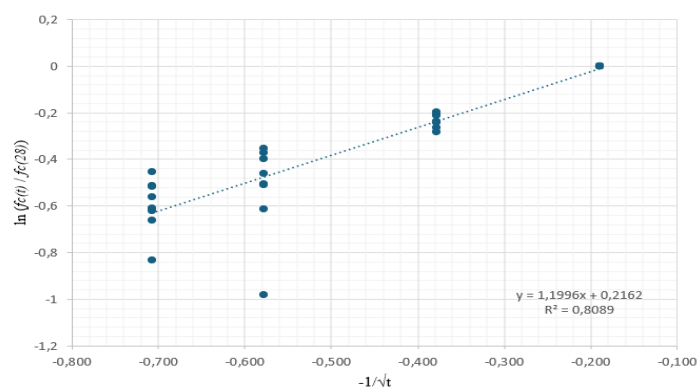


Figura K.274 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,55$. Ano: 1979.

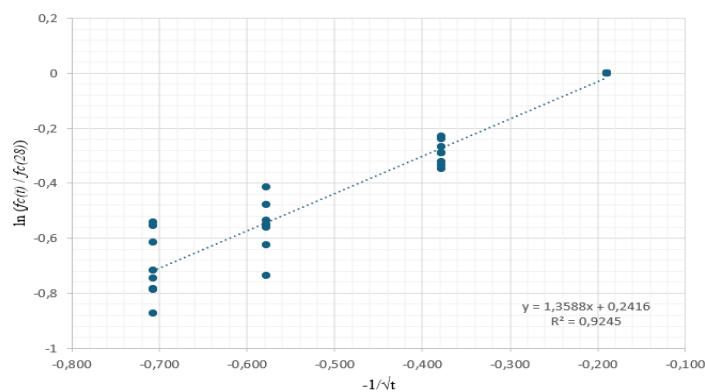


Figura K.275 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,65$. Ano: 1979.

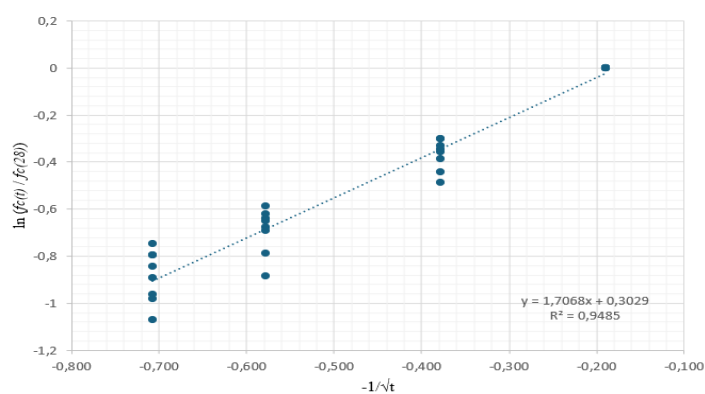
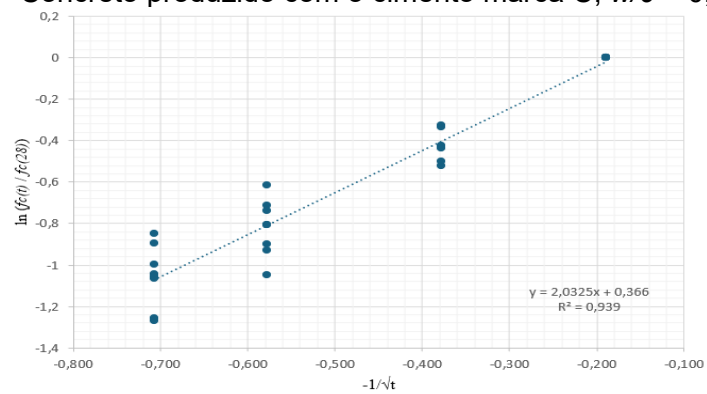


Figura K.276 – Concreto produzido com o cimento marca C, $w/c = 0,75$. Ano: 1979.



Anexo L

Tango (1983).

Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto.

Figura L.1 – Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de concretos produzidos com cimento tipo CP I, da Marca A, para diferentes relações w/c .

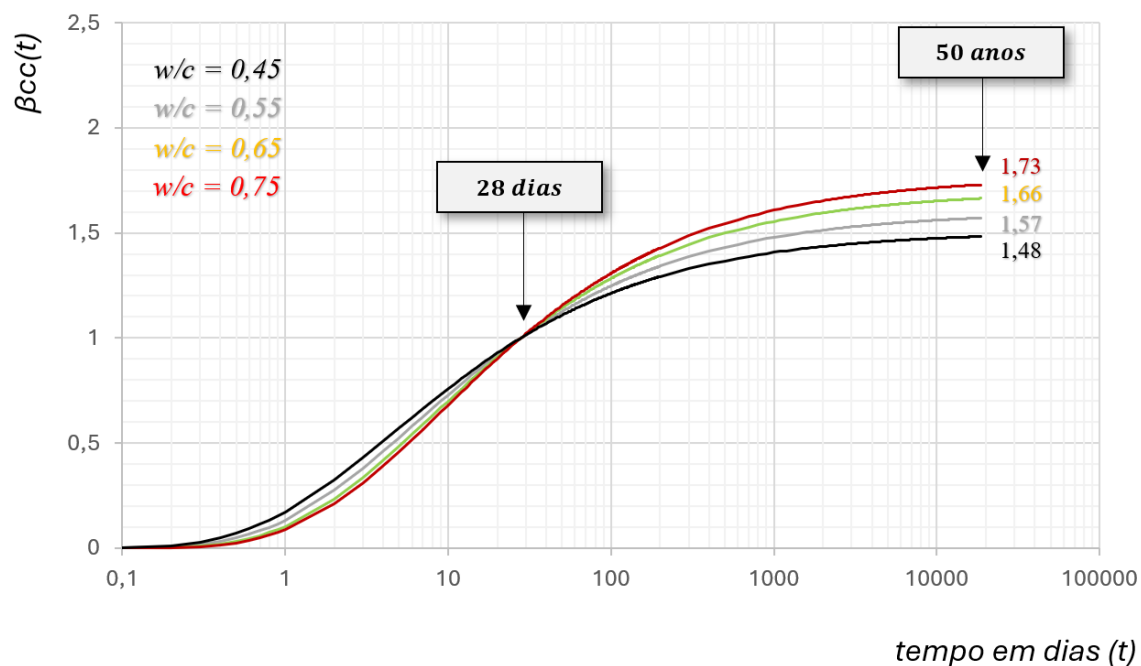


Figura L.2 – Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de concretos produzidos com cimento tipo CP I, da Marca B, para diferentes relações w/c .

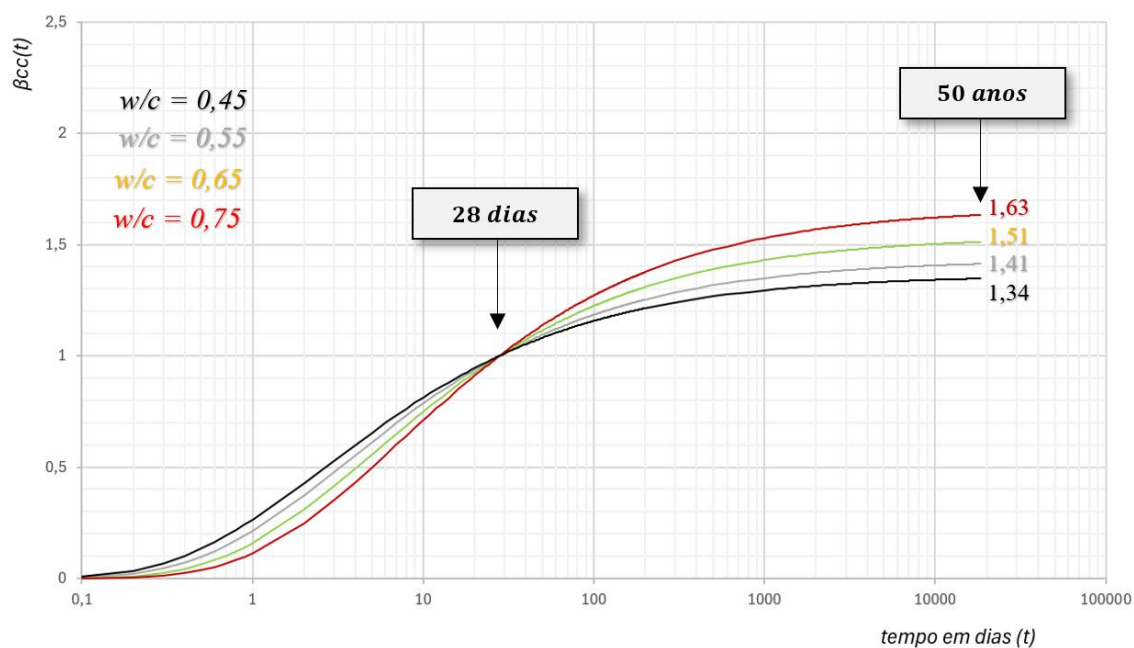
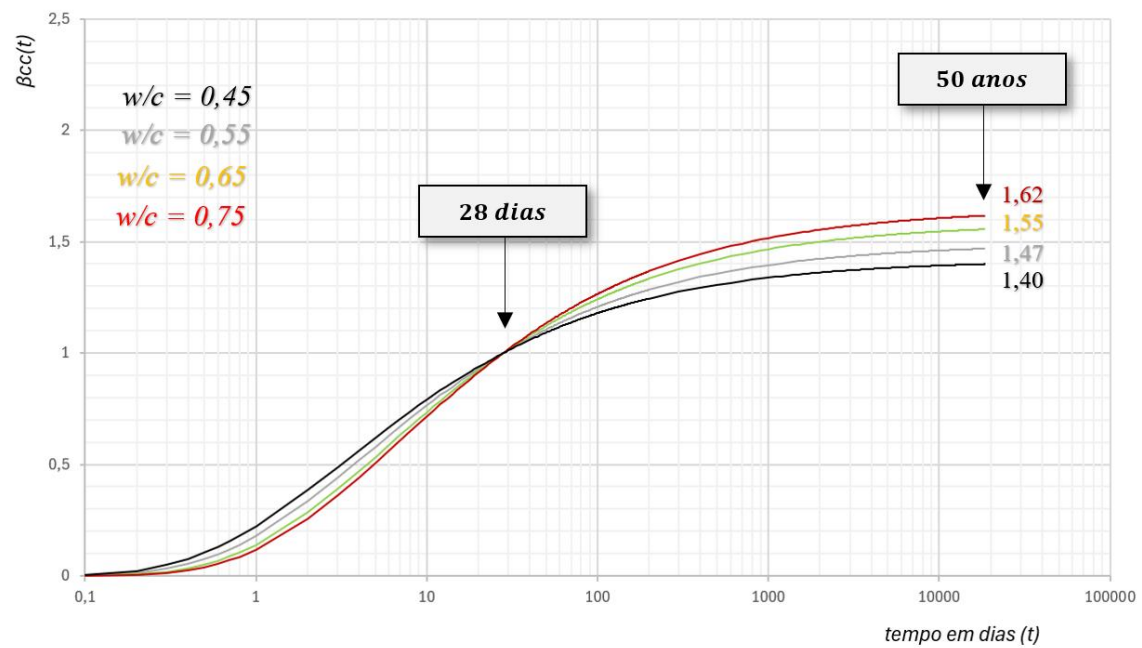


Figura L.3 – Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de concretos produzidos com cimento tipo CP I, da Marca C, para diferentes relações w/c .



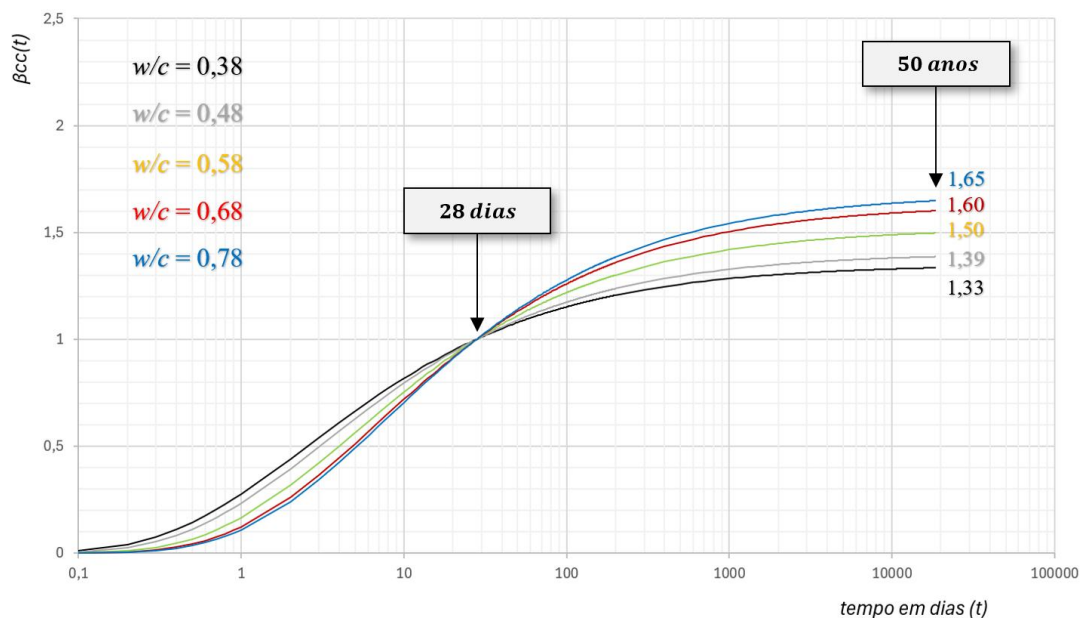
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Tango (1983).

Anexo M

Helene (1987).

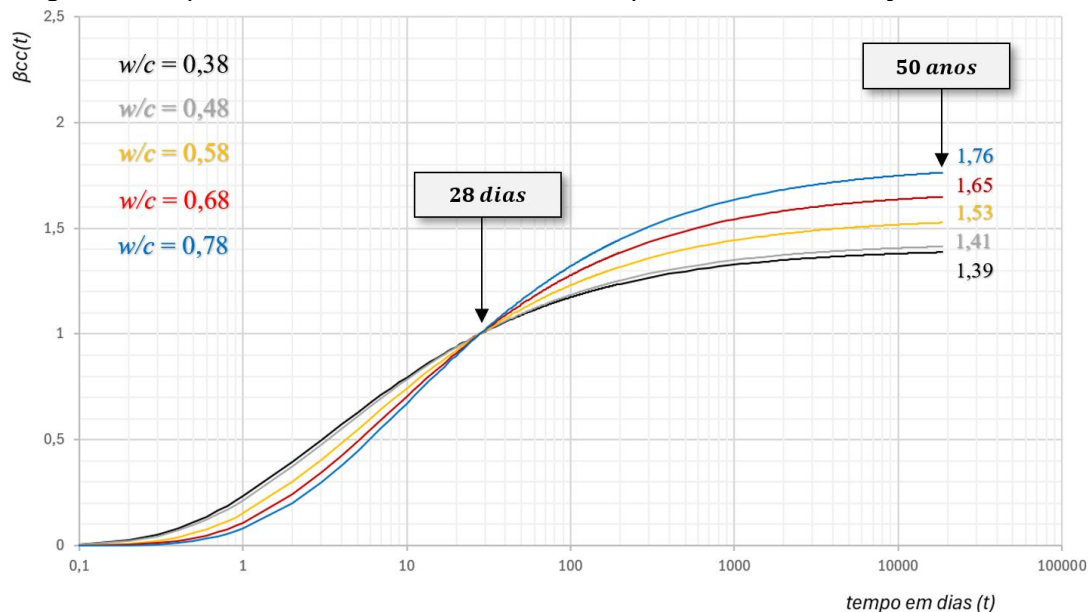
Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto.

Figura M.1 – Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de argamassas produzidas com cimento CP 32, para diferentes relações w/c.



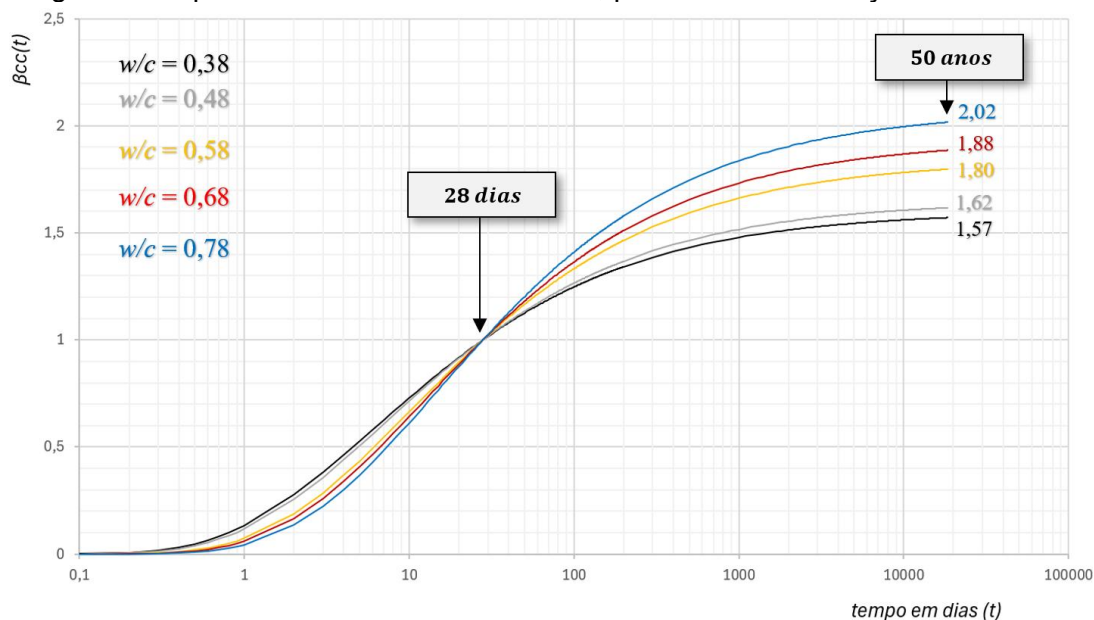
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Helene (1987).

Figura M.2 – Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de argamassas produzidas com cimento POZ 32, para diferentes relações w/c.



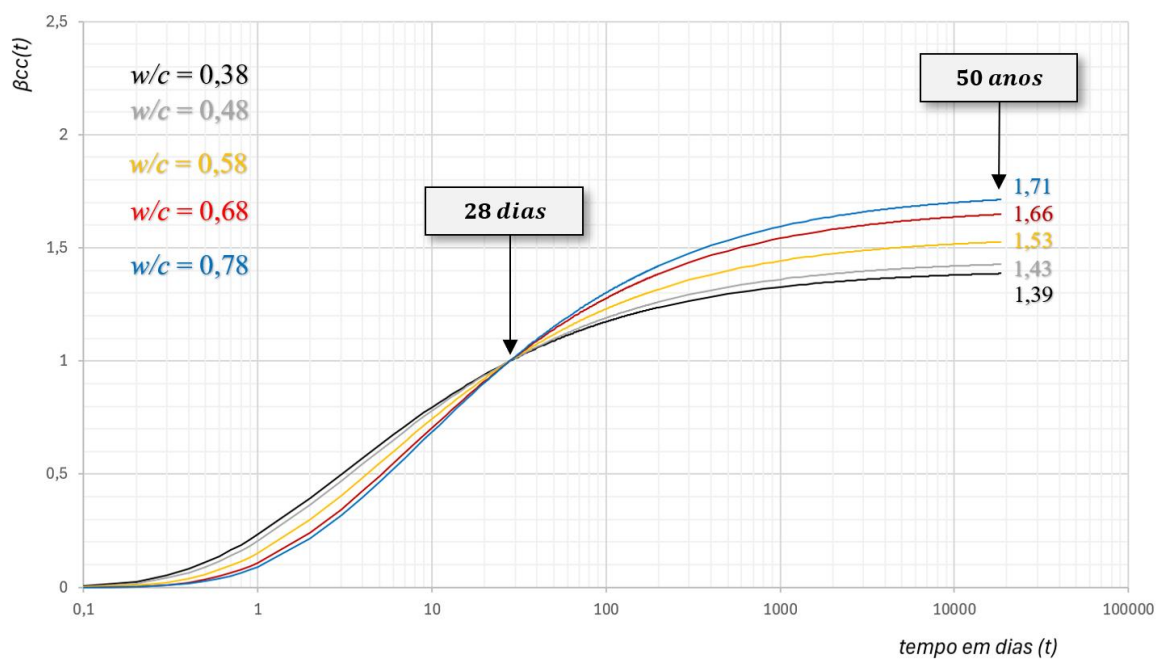
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Helene (1987).

Figura M.3 – Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de argamassas produzidas com cimento AF 32, para diferentes relações w/c .



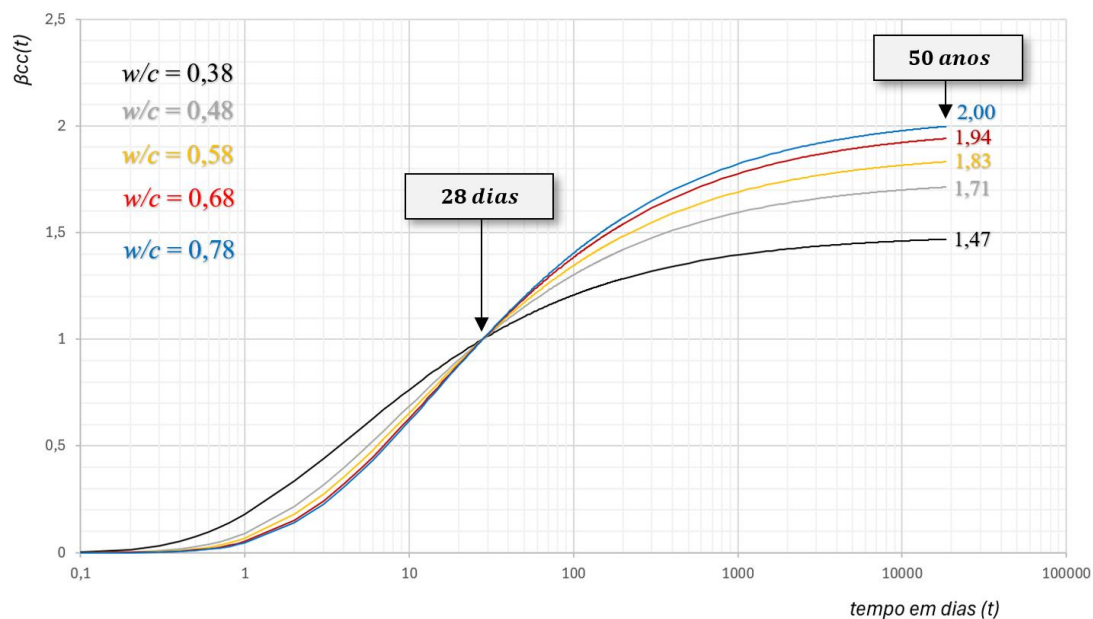
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Helene (1987).

Figura M.4 – Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de argamassas produzidas com cimento CP 25, para diferentes relações w/c .



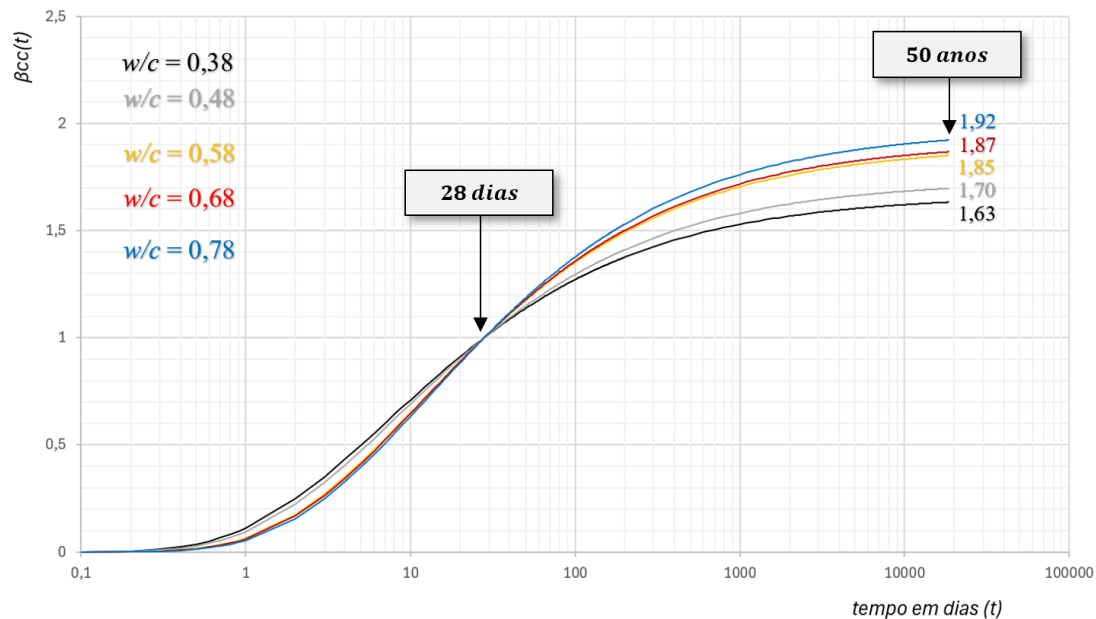
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Helene (1987).

Figura M.5 – Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de argamassas produzidas com cimento POZ 25, para diferentes relações w/c .



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Helene (1987).

Figura M.6 – Curvas de crescimento relativo da resistência à compressão de argamassas produzidas com cimento AF 25, para diferentes relações w/c .



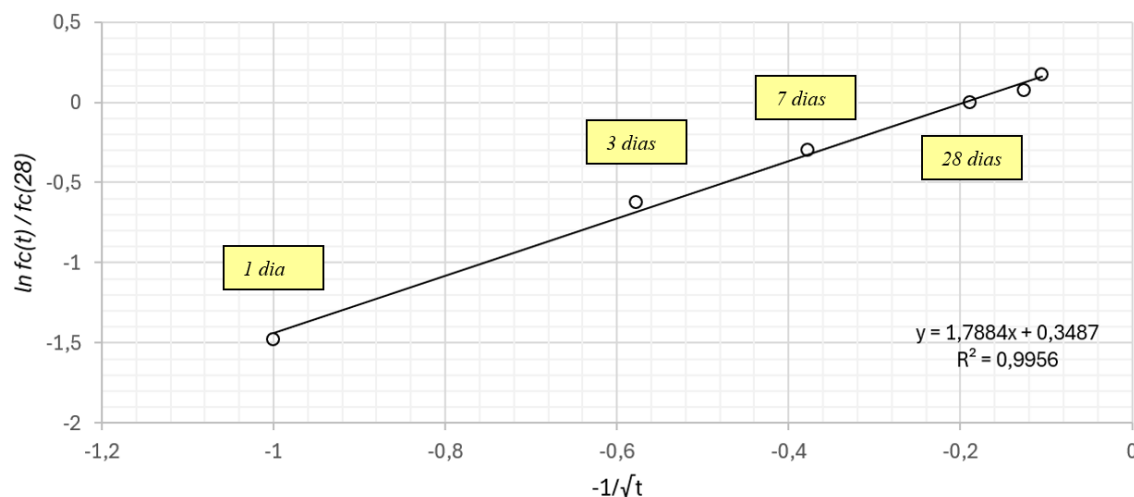
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Helene (1987).

Anexo N

Battagin, Battagin e Munhóz (2010).

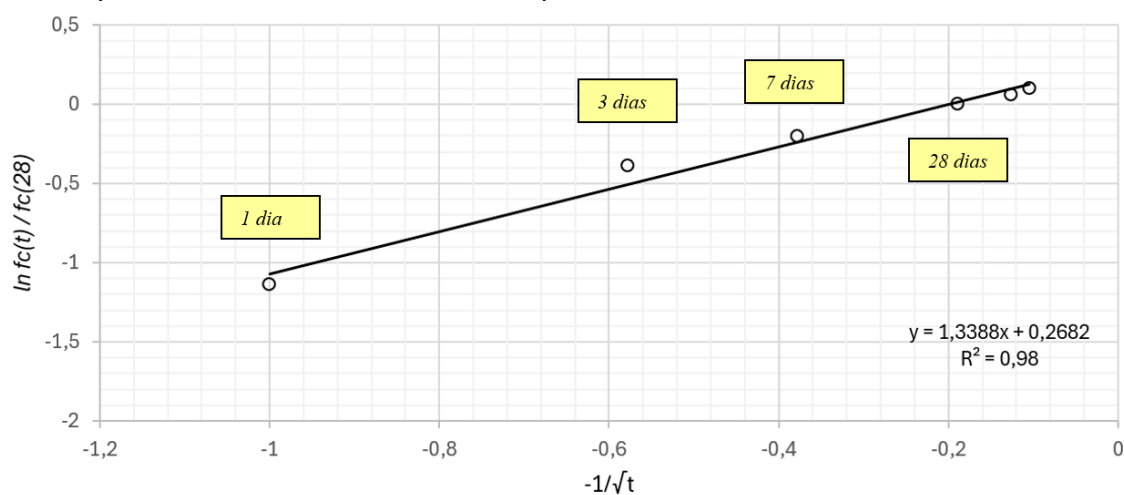
Representação linear das curvas de crescimento da resistência à compressão.

Figura N.1 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão de argamassa produzida com cimento Portland tipo CP II E - 32.



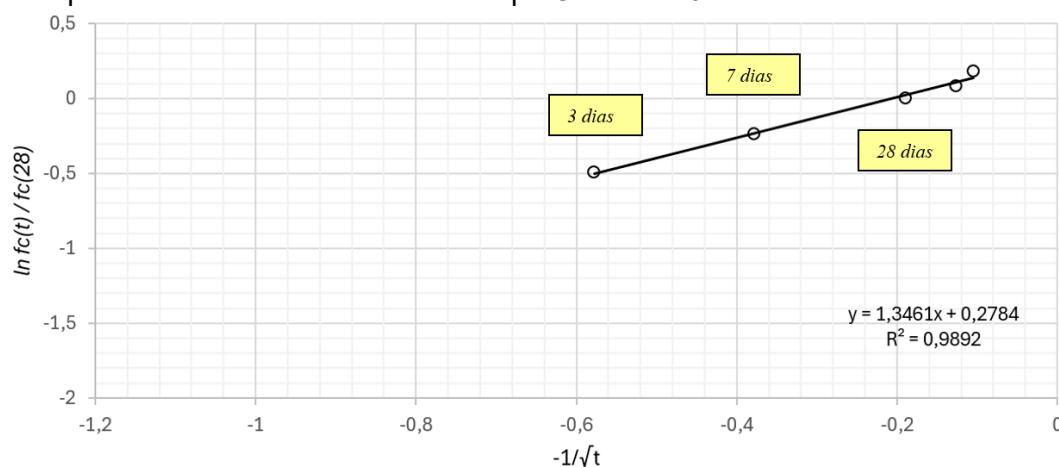
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Battagin, Battagin e Munhóz (2010).

Figura N.2 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão de argamassa produzida com cimento Portland tipo CP II F - 32.



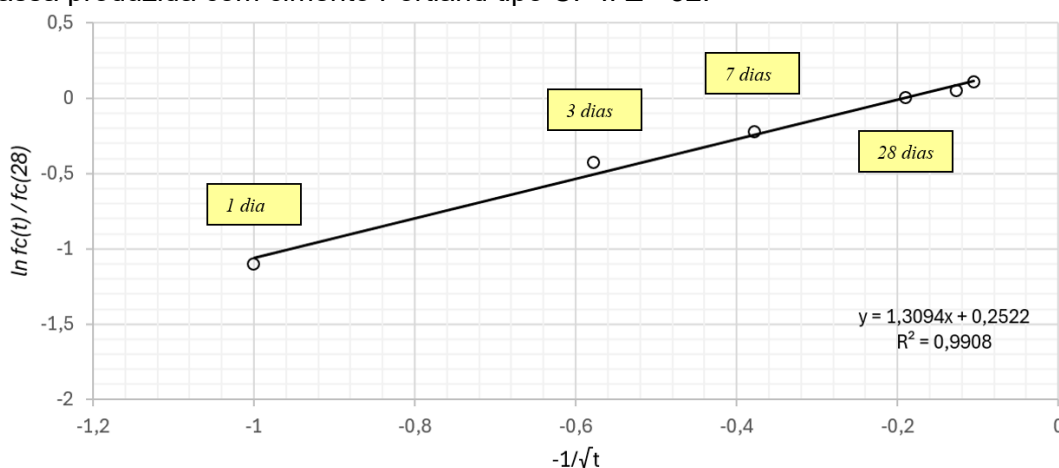
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Battagin, Battagin e Munhóz (2010).

Figura N.3 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão de argamassa produzida com cimento Portland tipo CP II E - 40.



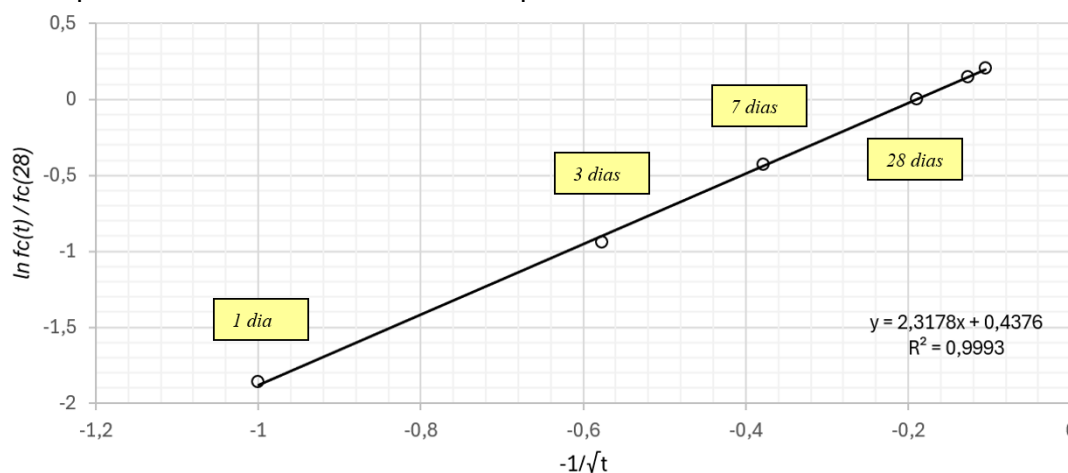
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Battagin, Battagin e Munhóz (2010).

Figura N.4 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão de argamassa produzida com cimento Portland tipo CP II Z - 32.



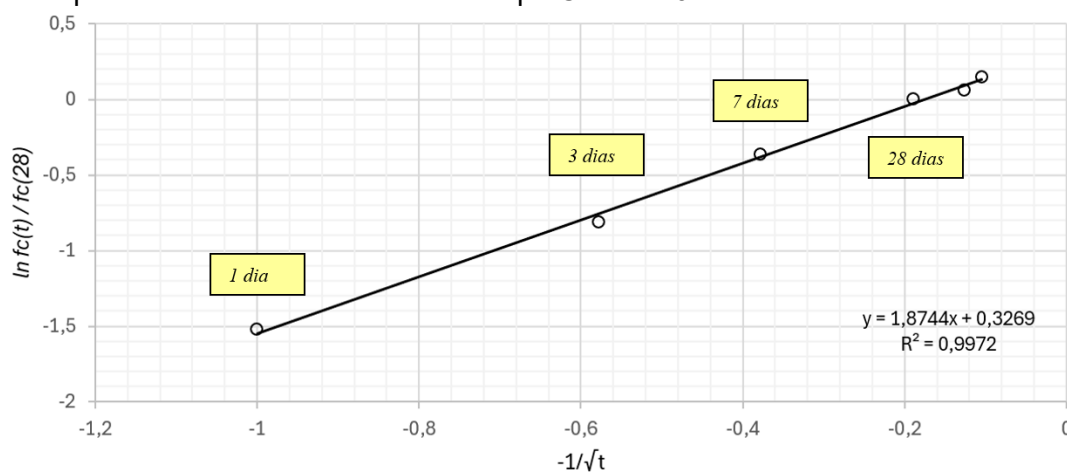
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Battagin, Battagin e Munhóz (2010).

Figura N.5 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão de argamassa produzida com cimento Portland tipo CP III - 32.



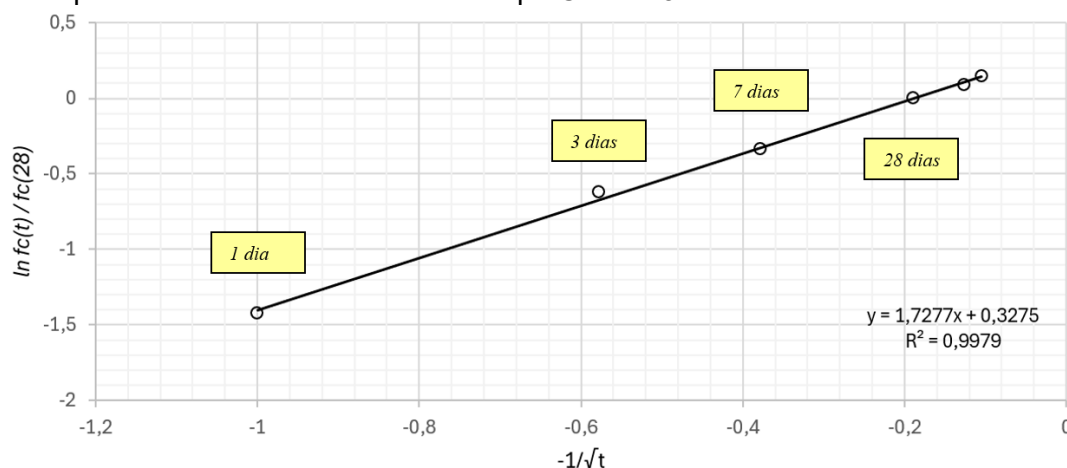
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Battagin, Battagin e Munhóz (2010).

Figura N.6 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão de argamassa produzida com cimento Portland tipo CP III - 40.



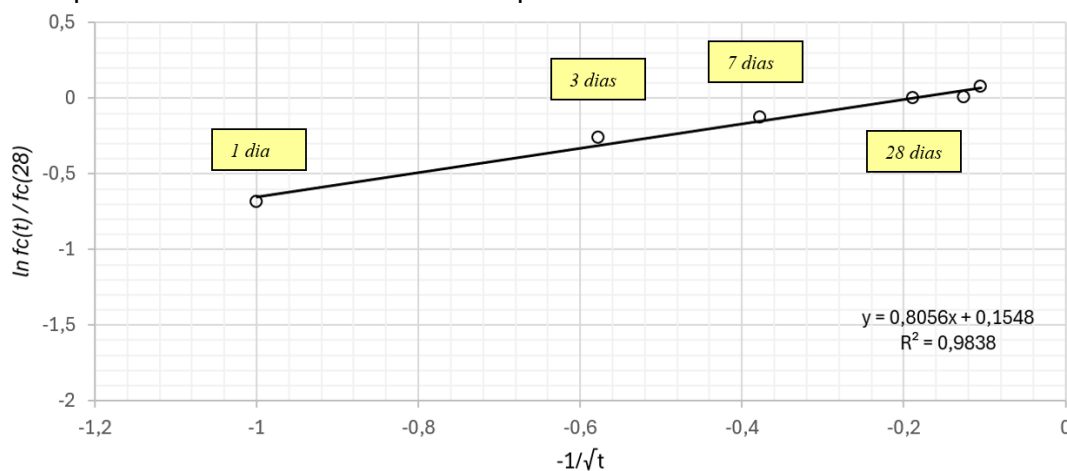
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Battagin, Battagin e Munhóz (2010).

Figura N.7 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão de argamassa produzida com cimento Portland tipo CP IV - 32.



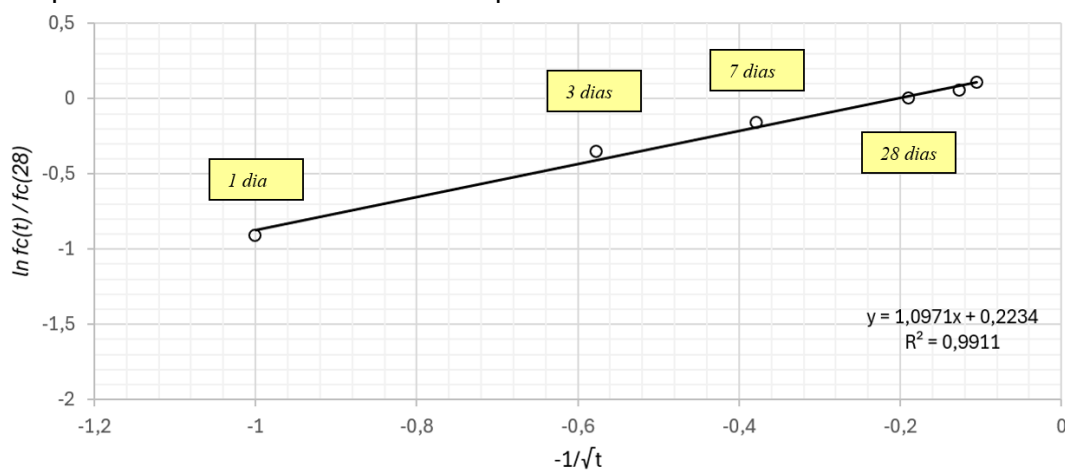
Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Battagin, Battagin e Munhóz (2010).

Figura N.8 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão de argamassa produzida com cimento Portland tipo CP V - ARI.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Battagin, Battagin e Munhóz (2010).

Figura N.9 – Representação linear da curva de crescimento da resistência à compressão de argamassa produzida com cimento Portland tipo CP V - ARI RS.



Fonte: Elaborada pelo autor, com base em Battagin, Battagin e Munhóz (2010).