

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Aplicação do Ensaio APULOT na Determinação da Resistência à
Compressão *in loco* do Concreto nas Primeiras Idades**

Sergio Elías Gavilán Martínez

Porto Alegre
2017

SERGIO ELÍAS GAVILÁN MARTÍNEZ

**APLICAÇÃO DO ENSAIO APULOT NA DETERMINAÇÃO
DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO *IN LOCO* DO
CONCRETO NAS PRIMEIRAS IDADES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre
2017

SERGIO ELÍAS GAVILÁN MARTÍNEZ

**APLICAÇÃO DO ENSAIO APULOT NA DETERMINAÇÃO
DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO *IN LOCO* DO
CONCRETO NAS PRIMEIRAS IDADES**

Esta tese de doutorado foi julgada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 16 de Agosto de 2017

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Ph.D. pela University of Leeds
orientador

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)
Dr. pela Universidade de São Paulo (USP)

Profª. Mônica Pinto Barbosa (UNESP)
Dra. pelo Institut National des Sciences Appliquées (INSA-LYON)

Prof. Enio Pazini Figueiredo (UFG)
Dr. pela Universidade São Paulo (USP)

Dedico este trabalho à mulher que é minha companheira de vida, Rosanna, pelo apoio incondicional em todos os momentos, principalmente no momento de tomar a decisão de cumprir meu sonho e fazer o doutorado. Sem ela, eu não poderia ter superado as horas de maior dificuldade, ansiedade e estresse, durante os meses em que me dediquei inteiramente ao doutorado. Ela é meu chão!

Aos meus amados filhos Alvaro, Joaquín, Diego e minha rainha Micaela por compreenderem a situação vivida e entender que não há limite de idade para a absorção de novos conhecimentos.

A minha mãe Luisa, que dignamente me mostrou a importância da família e o caminho da persistência em busca de um sonho.

A minha irmã Paola, que sempre foi um apoio incondicional para a família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me tem proporcionado todas as condições de saúde, família e trabalho, em quem creio ser o responsável pelo sucesso em todas as etapas deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Eng. Vitervo O' Reilly (in memoriam) que me animou a fazer o Doutorado, não simplesmente pela formação própria, porém pela necessidade do Paraguai avançar no conhecimento do concreto.

Ao Prof. Msc. Eng. Carlos Bellasai quem me mostrou sua visão do futuro da construção e educação no Paraguai e encorajou-me para fazer o Doutorado.

Ao Prof. Eng. Jorge Brunetti quem ficou na frente da Gavilan & Associados no período que morei em Porto Alegre e no período de preparação da qualificação.

Ao Prof. Dr. Eng. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, que em cada encontro dos congressos de Patologia me entusiasmara para fazer o Doutorado, e me deu um recebimento muito caloroso com toda a comunidade do LEME (Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais). Além de todas as grandes qualidades humanas dele é um profundo conhecedor do tema desta tese, deu uma orientação eficiente, sem restrição apoio e inestimável estímulo, fundamentais para a conclusão deste trabalho.

À Profª. Dra. Eng. Mônica Pinto Barbosa, que me ajudou desde o início do trabalho, e sempre deu uma resposta rápida a todos os e-mails com minhas dúvidas. Uma gratidão enorme por aceitar o convite para uma conferencia no meu país e acompanhar dessa maneira a última concretagem da parte experimental do trabalho e fazer muitas sugestões interessantes na qualificação para concluí-lo.

À Profª. Dra. Eng. Denise Carpena Coitinho dal Molin que me demonstrou que ninguém pode acabar com todos os aspectos de um tema de investigação, fez muito boas correções na banca de qualificação e me deu umas das melhores aulas na disciplina de Patologia do Concreto.

À Profª. Dra. Eng. Angela Borges Masuero que me ensinou como fazer uma revisão crítica e de utilidade de um artigo científico e poder diferenciar o que realmente importa para transmitir ao meio técnico.

Ao Prof. Msc. Eng. João Campagnolo, de quem aprendi como ensinar a Patologia do Concreto em aulas totalmente práticas no Laboratório do LEME.

Ao Prof. Dr. Eng. Jean Marie Désir pelas oportunas correções na banca de qualificação.

Ao Prof. Dr. Eng. Bruno do Vale Silva, meu companheiro de pesquisa na área de APULOT, quem me brindo sua amizade desde que cheguei e com quem fizemos grandes conversas sobre a aplicação dos ensaios que relacionam a resistência do concreto com a aderência, e que também fizera importantes contribuições como membro da banca na qualificação.

Ao Dr. Eng. Jacinto de Almeida pela sua amizade desde os primeiros contatos e ajuda na realização de ensaios no laboratório.

À equipe de alunos, pesquisadores, professores, técnicos, secretária e funcionários do LEME pela amizade adquirida e apoio na realização deste trabalho. Luciane Caetano; Luiza Pacheco, Tamara Baggio, Victor Dal Bosco; Josué Chies; Ângela Graeff; Lucas Giroto; Eurípedes Fontes e Edgar Lucas.

Ao doutorando Eng. Hermann Segovia pela sua ajuda nos processos de documentação requerida tanto para a qualificação como a defesa.

À Secretaria do PPGEC/UFRGS, Liliani Gaeversen, Carmen Rodrigues e Ana Maria Buchain pela amizade e apoio na organização da documentação em todo o processo de doutorado.

À Eng. María Elisa Martínez da Concret-Mix, fornecedora do concreto na etapa experimental, quem teve o máximo de cuidado em fazer concretos iguais em diferentes datas e sempre me brindou todo o seu apoio para levar adiante este trabalho.

Ao Técnico Sergio Salinas quem mudou para Porto Alegre para ajudar-me na parte experimental no laboratório e sempre esteve pensando na forma prática de implementar o ensaio no canteiro.

Ao Prof. Eng. Carlos Montero que fez tudo o possível para que as aulas da nossa cátedra na FIUNA tivessem o menor impacto por motivo das minhas numerosas viagens.

Aos meus alunos que fizeram trabalhos de final de graduação na FIUNA com base nos ensaios do APULOT e maturidade, Hugo Lovera, Alicia Frutos, Sofía Larán, Adrián Candia, Jorge Bobadilla, Carlos Ramirez e Victor Manuel Gaona.

As empresas que nós permitiram fazer o controle da resistência do concreto in loco: AGB Constructora S.A, Gomez Abente Constructora S.A, BIEBER & CÍA - Bieber Gruppe, Consorcio Las Residentas S.A, Salum&Wenz S.A, CDD Constructora S.A, Municipalidad de Asuncion-Ing.Samuel Gonzalez Segnana.

Aos funcionários da Gavilán & Asociados S.A. pela sua compreensão pela minha falta de tempo para atender questões com clientes, devido às numerosas viagens nesse período de quatro anos. Especial reconhecimento às engenheiras Rita Abdala e Pamela López pela ajuda, fizeram muito além do que as suas obrigações.

Ao CONACYT (Consejo Nacional de Ciencias y Tecnologías) do Paraguai pela bolsa de estudos concedida, que foi de uma valiosa ajuda para a realização da pesquisa.

Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa,
nunca tem medo e nunca se arrepende.

Leonardo da Vinci

Ao expandirmos o campo do conhecimento apenas
aumentamos o horizonte da ignorância.

Miller, Henry

RESUMO

GAVILÁN MARTÍNEZ, S. E. **Aplicação do ensaio APULOT na determinação da resistência à compressão *in loco* do concreto nas primeiras idades.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

A presente pesquisa propõe analisar, avaliar e validar o uso de ensaios de aderência aço-concreto para estimativa da resistência à compressão axial do concreto *in loco* nas primeiras idades em canteiros de obras, como alternativa ao controle de qualidade tradicional. Alguns pesquisadores propuseram a utilização de um ensaio de aderência modificado, que denominaram *Appropriate Pull-Out Test* (APULOT), como uma adaptação do método *pull-out test* (POT) tradicional, normalizado pela norma EN12504-3. Para viabilizar o uso do ensaio APULOT como ensaio que possa ser implementado na prática do controle tecnológico do concreto em canteiros de obras e seja representativo da resistência *in loco* é necessário definir um padrão para o mesmo. O presente trabalho desenvolveu um molde específico para o ensaio, analisou a influência do processo da cura nos resultados da tensão máxima de aderência, estudou como a medição da maturidade no concreto pôde auxiliar na determinação do momento certo para fazer o ensaio de arrancamento e comparou resultados dos ensaios feitos em corpos de prova para teste de aderência com ensaios de arrancamento de barras de aço em painéis de concreto. Para tanto foram feitos nove concretagens empregando diferentes tamanhos e configurações de corpos de prova, ensaios de arrancamento, extrações de testemunhos de painéis de concreto, ensaios à compressão simples e medições de maturidade dos concretos empregados. Também se realizaram registros de temperatura ambiente e velocidade do vento na vizinhança dos painéis, buscando estabelecer relações entre a maturidade e as condições ambientais do canteiro. Os ensaios descritos anteriormente realizaram-se às idades de 3, 5, 7 e 28 dias. Os resultados obtidos mostram que, sob condições padronizadas de ensaio, existe ótima correlação entre a tensão máxima de aderência e a resistência à compressão do concreto e por tanto o ensaio de aderência pode ser utilizado para fazer uma estimativa da resistência à compressão do concreto *in loco* nas primeiras idades.

Palavras-chave: *resistência á compressão; maturidade; arrancamento; aderência aço-concreto; primeiras idades do concreto.*

ABSTRACT

GAVILÁN MARTÍNEZ, S. E. **Aplicação do ensaio APULOT na determinação da resistência à compressão *in loco* do concreto nas primeiras idades.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

This research aims to analyze, evaluate and validate the use of steel-concrete bond tests to estimate the axial compression strength of *in situ* concrete at early ages on construction sites, as alternative to conventional strength control tests. Some researchers have proposed the use of a modified bond test, named *Appropriate Pull-Out Test* (APULOT), as an adaptation of the traditional pull-out test method (*POT*) standardized by the EN12504-3. To implement the APULOT as a strength control procedure for concrete on construction site, standardization is needed. This study developed a specific mold for the test; analyzed the influence of curing process on the results of the maximum bond stress; studied how measuring the maturity in the concrete could help to determine when is the right time to make the pull-out test; compared results of tests made on cores for testing the bond and pull-out tests on steel bars in concrete panels. Therefore, it have been made nine concrete events, pull-out tests using different sizes and configurations of cylindrical concret specimen, pull-out tests and extraction of cores from concrete panels, compressive test and maturity measurements of specific employees. Also, temperature and wind speed records have been performed in the panel's surroundings, seeking to establish relationships between maturity and ambiental conditions on construction site. The tests described above were carried out at 3, 5, 7 and 28 days. The results show that, under standardized test conditions, a correlation between the maximum bond stress and the concrete compression strength exists, and therefore, bond test can be used to estimate the *in situ* compression strength of the concrete in the first ages.

Key- words: *compression strength; maturity; pull-out; steel-concrete bond; first ages concrete.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fluxograma do planejamento do experimento	35
Figura 2.1 – Imagem da microestrutura depois de 180 minutos do início da hidratação, onde o azul claro é C3S, o azul forte é hidróxido de cálcio, o marrom é C-S-H, o cinza é C3A, o verde é etringita e o amarelo é gesso	38
Figura 2.2 – Volume relativo de cada uma das fases como função do grau da hidratação	40
Figura 2.3 – Taxa da hidratação da alita em função do tempo	42
Figura 2.4 – Representação esquemática das proporções volumétricas: (a) antes da hidratação e (b) durante a hidratação	43
Figura 2.5 – Esquema da distribuição do tamanho dos poros no concreto	44
Figura 2.6 – Distribuição do tamanho do poro na pasta de cimento com uma $a/c = 0,5$.	45
Figura 2.7 – Laboratórios por Estados brasileiros	48
Figura 2.8 – Distribuição de dados da resistência à compressão do concreto e distribuição normal correspondente	49
Figura 2.9 – Relação entre as resistência à compressão e porosidade do concreto	55
Figura 2.10 – Corpo de prova depois da moldagem em uma sacola com juta.....	57
Figura 2.11 – Silicato anidro rodeado por um halo de hidratação em uma pasta mantida a temperatura de 4 °C (x 1.000 aumentos)	59
Figura 2.12 – Silicato anidro rodeado por um halo de hidratação em uma pasta mantida a temperatura de 20 °C (x 1.000 aumentos)	60
Figura 2.13 – Silicato anidro rodeado por um halo de hidratação em uma pasta mantida a temperatura de 36 °C (x 1.000 aumentos)	60
Figura 2.14 – Imagens escaneadas correspondentes aos topos dos corpos de prova: (a) regularização com neoprene, (b) retificado e (c) capeamento com enxofre	62
Figura 2.15 – Corpos de prova com: a) superfície plana e irregular, b) adensamento inadequado, c) e d) acabamento inadequado do topo	63
Figura 2.16 – Corpos de prova com manipulação deficiente para ao laboratório.....	64
Figura 2.17 – Desenvolvimento da temperatura ao longo do tempo	65

Figura 2.18 – Influência da temperatura no desenvolvimento da resistência à compressão para uma mistura de concreto com fator $a/c = 0,3$	66
Figura 2.19 – Ensaios não destrutivos para a determinação da resistência do concreto ..	70
Figura 2.20 – Equipamento de ultrassom	72
Figura 2.21 – Configurações de medições de velocidade de onda ultrassônica	72
Figura 2.22 – Sistemática de funcionamento do ensaio de arrancamento de pino	75
Figura 2.23 – Partes do equipamento LOK-TEST.....	75
Figura 2.24 – Equipamento LOK-TEST tipo de falha do concreto	76
Figura 2.25 – Exemplo de aplicação da correlação entre a força de arrancamento e a resistência à compressão, mostrando o efeito de diferentes calibrações realizadas em laboratório e em campo, utilizando cubos de concreto e uma estrutura de concreto....	77
Figura 2.26 – Ensaio: a) configuração PZT (transdutor piezoelétrico) e b) ensaio de medição da impedância	78
Figura 2.27 – Equipamento para medir a resistividade elétrica do concreto sem contato	79
Figura 2.28 – Esquema da instrumentação do coeficiente de expansão térmica.....	79
Figura 3.1 – Quadro dos primeiros regulamentos dos concretos estruturais	81
Figura 3.2 – Tipos de barras de aço em 1910; a) <i>Thatcher Bulb Bar</i> , b) <i>Twisted Lug Bar</i> , c) <i>Monolith Bar</i> e d) <i>Cup Bar</i>	83
Figura 3.3 – Modelo <i>pull-out</i> cúbico com “h” próximo a 200 mm e distribuição das tensões no corpo de prova para o ensaio <i>pull-out</i>	83
Figura 3.4 – Configurações geométricas das barras de aço utilizadas	85
Figura 3.5 – Variações da ancoragem do aço no concreto	85
Figura 3.6 – Correlação entre a resistência à compressão do concreto e a resistência máxima de aderência aço-concreto	86
Figura 3.7 – Correlação entre a resistência à compressão do concreto e a resistência máxima de aderência aço-concreto, no período 1912-1932	87
Figura 3.8 – Configurações do ensaio <i>pull-out</i> , com diferentes cobrimentos de barras de aço	87
Figura 3.9 – Tipos de barras de aço na década de 80: a) YSTEG, b) Tor-40 e c) Tetracero-42	88
Figura 3.10 – Mecanismos de transferência das forças de aderência	89

Figura 3.11 – Esmagamento contínuo do concreto na frente da nervura enquanto ocorre o deslizamento da barra de aço, em que a cor cinza indica a posição da nervura deslocada	90
Figura 3.12 – Vista lateral de uma barra com ângulo da nervura da barra “ α ” mostrando formação de fissuras	91
Figura 3.13 – Tensões transversais em torno de uma barra sendo puxada	92
Figura 3.14 – Estado de tensões de uma porção de concreto diante de uma nervura	92
Figura 3.15 – Tensões transversais em torno de uma barra sendo puxada com tensão de tração nula	93
Figura 3.16 – Distribuição de tensões no aço e no concreto, devido à transferência de forças entre os materiais	94
Figura 3.17 – Vista lateral de uma barra mostrando fenda de corte paralela à barra de arrancamento e/ou concreto com esmagamentos locais	95
Figura 3.18 – Acabamento superficial de fios e barras lisas	95
Figura 3.19 – Alguns tipos de ensaios <i>pull-out</i> desenvolvidos	96
Figura 3.20 – Desenho esquemático do método de ensaio de arrancamento direto	96
Figura 3.21 – Distribuição da tensão de aderência ao longo da barra	97
Figura 3.22 – Ilustração dos componentes do ensaio de arrancamento	98
Figura 3.23 – Desenhos esquemáticos do corpo de prova para ensaio	98
Figura 3.24 – Exigência atual da NBR 7480:2007 (ABNT, 2007b) para barras de alta aderência	100
Figura 3.25 – Início e propagação do fendilhamento em um concreto onde o cobrimento é pequeno em relação ao diâmetro da barra de aço	101
Figura 3.26 – Fendilhamento longitudinal visível	101
Figura 3.27 – Tipos de falhas em ancoragens retas no concreto sem estribos: a) falha de arrancamento sem fendilhamento e b) fendilhamento no caso de cobrimento pequeno em relação ao diâmetro da barra de aço	102
Figura 3.28 – Evolução da tensão máxima de aderência pela relação c/\varnothing	102
Figura 3.29 – Gráfico da curva típica de tensão-deslizamento obtida em ensaios monotônicos de aderência	105
Figura 3.30 – Desenho esquemático do método APULOT	107

Figura 3.31 – Gráfico da curva de correlação entre a tensão máxima de aderência e a resistência à compressão	108
Figura 3.32 – Barras de aço com e sem separadores plásticos, garrafa PET e concretagem	109
Figura 3.33 – Cura dos corpos de prova e vista das mostras antes do ensaio APULOT	109
Figura 3.34 – Ensaio APULOT	109
Figura 3.35 – Rupturas por deslizamento de barra de 8 mm, à esquerda, e fendilhamento para barra de 10 mm, à direita, com o mesmo tipo de molde	110
Figura 3.36 – Pré-requisitos requeridos para implementação do ensaio como método de controle da qualidade do concreto	112
Figura 4.1 – Esquemas dos corpos de prova APULOT	115
Figura 4.2 – Seção de uma fôrma para moldagem e vista de um corpo de prova CAPULOT	115
Figura 4.3 – Corpos de prova APULOT e CAPULOT moldados na Concretagem 1	117
Figura 4.4 – Corpos de prova CAPULOT com várias dimensões moldados na Concretagem 2	118
Figura 4.5 – Desmoldagem de corpos de prova APULOT e retirada do PET.....	118
Figura 4.6 – Armazenamento de corpos de prova CAPULOT e APULOT	119
Figura 4.7 – Ensaio à compressão simples de um CP	120
Figura 4.8 – Conjunto hidráulico para ensaios de arrancamento	120
Figura 4.9 – Calibração do conjunto hidráulico	121
Figura 4.10 – Vista do manômetro e leitura da carga na prensa hidráulica	121
Figura 4.11 – Gráfico de correlação entre leitura do manômetro e leitura da prensa	122
Figura 4.12 – Ensaio de um corpo de prova APULOT	122
Figura 4.13 – Ensaio de um corpo de prova prismático de 8,5 cm x 8,5 cm x 10,0 cm ...	123
Figura 4.14 – Ensaio de um corpo de prova cúbico de aresta de 12,5 cm	123
Figura 4.15 – Fendilhamento em dois corpos de prova APULOT	124
Figura 4.16 – Vista esquemática de painel para ensaios. Dimensões em “m”.....	125
Figura 4.17 – Vista esquemática da localização de testemunhos. Dimensões em “mm” ..	126

Figura 4.18 – Localização das áreas para ensaios SBPULOT. Dimensões em “mm” ..	127
Figura 4.19 – Esquema para o ensaio SBPULOT	127
Figura 4.20 – Vista esquemática dos setores de ensaios em um painel	128
Figura 4.21 – Seção de uma forma para moldagem e vista de um corpo de prova CAPULOT	128
Figura 4.22 – Esquema do campo de experimentação onde foram construídos os painéis	131
Figura 4.23 – Vista geral do campo de experimentação	131
Figura 4.24 – Esquema de locação de painéis na Concretagem 1	134
Figura 4.25 – Montagem da fôrma e colocação de suportes de barras de ensaio em painéis	135
Figura 4.26 – Fixação de barras de ensaio ao nível correspondente, com indicação das zonas aderente e não aderente	135
Figura 4.27 – Colocação das termocuplas para medição de maturidade	136
Figura 4.28 – Vista dos painéis prontos para a concretagem	136
Figura 4.29 – Medidor de temperatura ambiente e de velocidade do vento	137
Figura 4.30 – Montagem dos moldes CAPULOT	137
Figura 4.31 – Fixação dos separadores para regiões não aderentes	138
Figura 4.32 – Fixação das barras nos moldes CAPULOT	138
Figura 4.33 – Descarga do concreto em painéis	139
Figura 4.34 – Ensaio de consistência, conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998) e controle de temperatura, com leituras de, respectivamente, 70 mm e 23,4 °C	139
Figura 4.35 – Primeira camada de concreto colocada	140
Figura 4.36 – Adensamento de segunda capa de concreto	140
Figura 4.37 – Regularização da superfície dos painéis	141
Figura 4.38 – Colocação de bordas de poliestireno expandido nos painéis para manter a água de cura	141
Figura 4.39 – Cura tipo CA por irrigação superficial	142
Figura 4.40 – Cura tipo CU por película de água permanente sobre o painel	142

Figura 4.41 – Adensamento de corpos de prova na mesa vibratória	143
Figura 4.42 – Colocação do concreto em uma forma CAPULOT	143
Figura 4.43 – Corpos de prova CAPULOT e CPs recém moldados	144
Figura 4.44 – Vista geral de corpos de prova CAPULOT e CPs	144
Figura 4.45 – Desmoldagem de corpos de prova CAPULOT	145
Figura 4.46 – Vista da etiqueta de identificação de um CP	146
Figura 4.47 – Corpos de prova desmoldados e identificados	146
Figura 4.48 – Armazenamento e cura de corpos de prova. a) Cura úmida tanque de água conta com um termostato para garantir a temperatura de 23 ± 2 °C. b) Cura ao ambiente do laboratório	147
Figura 4.49 – Extração de testemunhos.....	147
Figura 4.50 – Regularização de bases e topos dos testemunhos	148
Figura 4.51 – Medição das fatias dos testemunhos	149
Figura 4.52 – Gráfico das espessuras das fatias dos testemunhos nas primeiras idades da Concretagem 5	149
Figura 4.53 – Prensa hidráulica de compressão empregada	150
Figura 4.54 – a) Ensaio à compressão simples de testemunho. b) Sistema de leitura e registro.....	150
Figura 4.55 – Sensor de maturidade (termocupla) e adaptador USB para descarga de dados	151
Figura 4.56 – Descarga de leituras de maturidade	152
Figura 4.57 – Temperatura vs. tempo dos sensores do painel B da Concretagem 1	152
Figura 4.58 – Temperatura vs tempo dos sensores do painel B da Concretagem 1 nas primeiras 24 horas.....	153
Figura 4.59 – Comparação do fluxo de calor da hidratação da alita e da temperatura interna do concreto nas primeiras 24 horas. Painel B, Concretagem 1.....	153
Figura 4.60 – Maturidade vs. tempo dos sensores do painel B da Concretagem 1.....	154
Figura 4.61 – Calibração do conjunto hidráulico	154
Figura 4.62 –Correlação entre leitura do manômetro e leitura da prensa da Etapa 2	155
Figura 4.63 – Ensaios SBPULOT em painéis	155

Figura 4.64 – a) Ensaio em corpo de prova CAPULOT. b) Detalhe dos discos de neoprene em ensaio em corpo de prova CAPULOT.....	156
Figura 5.1 – Distribuição das variações dos ensaios.....	165
Figura 5.2 – Diferenças entre resultados CAPULOT e SBPULOT nas primeiras idades.	212
Figura 5.3 – Regressão simples de tensão máxima de aderência e resistência à compressão simples	215
Figura 5.4 – Regressão simples de tensão máxima de aderência e resistência à compressão simples com intervalo de estimação de 95%.....	216
Figura 5.5 – Regressão simples de tensão máxima de aderência e resistência à compressão simples com valores filtrados.....	216
Figura 5.6 – Regressão simples de tensão máxima de aderência e resistência à compressão simples de CPs.....	217
Figura 5.7 – Regressão simples de tensão máxima de aderência e resistência à compressão de CPs com intervalo de estimação de 95%.....	217
Figura 5.8 – Regressão simples de tensão máxima de aderência e resistência à compressão de CPs com valores filtrados.....	218
Figura 5.9 – Comparação entre a reta de regressão simples de tensão última de aderência e resistência à compressão simples com a obtida por Lorrain e Barbosa (2008)	218
Figura 5.10 –Crescimento da maturidade em painéis moldados na Concretagem 1.....	220
Figura 5.11 – Valores de maturidade obtidas nos 6 concretagens.....	220
Figura 5.12 – Registro da temperatura ambiente nos concretagens	221
Figura 5.13 – Valores mínimos de maturidade para execução dos ensaios CAPULOT segundo a classe do concreto e a temperatura ambiente.....	222
Figura 6.1 – Vista geral do prédio em construção.....	224
Figura 6.2 – Detalhes das vigas com cordoalhas.....	225
Figura 6.3 – Vista geral das diferenças no escoramento e cimbramento.....	225
Figura 6.4 – Moldes preparados para moldagem.....	226
Figura 6.5 – Sensor para medição da maturidade.....	226
Figura 6.6 – Proteção dos CAPULOTs no prédio.....	227
Figura 6.7 – Preparação para ensaio CAPULOT, bomba hidráulica conectada na rede elétrica da obra.....	227

Figura 6.8 – Controle da maturidade do concreto.....	228
Figura 6.9 – Execução do ensaio CAPULOT.....	228
Figura 6.10 – Vista geral da avenida.....	229
Figura 6.11 – Vista geral da avenida.....	229
Figura 6.12 – Moldagem dos CAPULOT.....	230
Figura 6.13 – Processo de colocação de sensores de medição da maturidade do concreto.....	230
Figura 6.14 – Cabos dos sensores de maturidade.....	231
Figura 6.15 – Cabo quebrado pelo vandalismo.....	231
Figura 6.16 – Medição da maturidade do concreto.....	232
Figura 6.17 – Vista geral do viaduto.....	232
Figura 6.18 – Moldagem dos CAPULOT e CPs.....	233
Figura 6.19 – Controle da maturidade do concreto.....	233
Figura 6.20 – Vista geral do canteiro.....	234
Figura 6.21 – Concretagem da estrutura.....	234
Figura 6.22 – CAPULOTs e CPs moldados.....	235
Figura 6.23 – Vista geral do prédio em construção.....	236
Figura 6.24 – Detalhes das cordoalhas na laje.....	236
Figura 6.25 – Concretagem da estrutura no dia e na noite.....	237
Figura 6.26 – Vista geral do escoramento.....	237
Figura 6.27 – Vista geral das diferenças no escoramento nos diferentes pavimentos.....	237
Figura 6.28 – Vista geral dos CAPULOT, CPs e medidores da maturidade do concreto.	238
Figura 6.29 – Vista geral das vigas de reforço.....	239
Figura 6.30 – Detalhe das vigas com cordoalhas e sensor de maturidade.....	239
Figura 6.31 – Moldagem dos CAPULOT.....	240
Figura 6.32 – Armazenamento dos CAPULOT.....	240
Figura 6.33 – Vista geral da estrutura em construção.....	241

Figura 6.34 – Vista do cimbramento e escoramento.....	241
Figura 6.35 – Colocação do sensor e medição da maturidade no primeiro dia.....	241
Figura 6.36 – Colocação e adensamento do concreto.....	242
Figura 6.37 – Moldagem dos CAPULOT e CPs.....	242
Figura 6.38 – Maturidade aos 3 dias nos canteiros de obra.....	243
Figura 6.39 – Dados obtidos dos ensaios em canteiros.....	244
Figura 6.40 – Estimação da resistência à compressão.....	244
Figura 6.41 – Distribuição do erro relativo de estimacão da resistência.....	246
Figura 6.42 – Traslados dos CAPULOTs e CPs para fazer ensaios no laboratório.....	247

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Componentes principais do cimento antes do início da hidratação.....	39
Tabela 2.2 – Valores médios típicos da composição de diferentes tipos de cimentos	40
Tabela 2.3 – Quantidade de corpos de prova por classe de resistência e percentual de concretos não conformes	47
Tabela 2.4 – Principais fatores que podem causar variações na resistência do concreto entre lotes e dentro de cada lote.....	52
Tabela 2.5 – Classificação e classes de resistência de concretos normais	52
Tabela 2.6 – Classificação e classes de massa específica de concretos	53
Tabela 2.7 – Classes de resistência de concretos estruturais	53
Tabela 2.8 – Requisitos do processo para o adensamento do concreto na moldagem dos corpos de prova, segundo a NBR 5738:2015 (ABNT, 2015a)	55
Tabela 2.9 – Requisitos do processo para o adensamento do concreto na moldagem dos corpos de prova, segundo a ASTM C31/C31 M-12 (ASTM, 2012)	56
Tabela 2.10 – Comparações entre os requisitos e comentários das NBR 5738:2015, CSN EN 12390-2 e ASTM C31/C31 M-12.....	58
Tabela 2.11 – Requisitos para o uso de pads de policloropreno (neoprene)	62
Tabela 2.12 – Funções e parâmetros de resistência-maturidade.....	67
Tabela 2.13 – Valores de “E _a ” para cimentos brasileiros	68
Tabela 2.14 – Fatores influentes nas medições de ultrassom.....	73
Tabela 2.15 – Quadro de equações de correlação.....	74
Tabela 2.16 – Limites aceitáveis segundo a quantidade de ensaios.....	77
Tabela 3.1 – Resumo das especificações de barras de aço de 1911 até 2000, de acordo com as especificações da ASTM, com rendimento mínimo e resistência mínima à tração em “MPa”	82
Tabela 3.2 – Distribuição da quantidade de ensaios <i>pull-out</i>	84
Tabela 3.3 – Características mecânicas exigíveis para barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado	100
Tabela 3.4 – Resumo dos valores limite da relação c/\varnothing	103

Tabela 3.5 – Cobrimentos mínimos em concreto sim protensão.....	104
Tabela 3.6 – Considerações e condições de projeto que influenciam na tensão de aderência aço-concreto	106
Tabela 4.1 – Detalhe de concretagens e elementos moldados.....	116
Tabela 4.2 – Dosagens empregados nos concretagens.....	117
Tabela 4.3 – Dosagens empregados nos concretagens.....	125
Tabela 4.4 – Etapas de cura tipo CA.....	130
Tabela 4.5 – Resumo geral de ensaios e medições da Etapa 2.....	133
Tabela 5.1 – Resultados de resistência à compressão simples em corpos de prova de 10 cm x 20 cm	158
Tabela 5.2 – Resultados de tensão máxima de aderência em corpos de prova APULOT de 85 mm x 100 mm	158
Tabela 5.3 – Resultados de tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT de 80 mm x 80 mm x 100 mm	159
Tabela 5.4 – Resultados de tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT de 85mm x 85mm x 100mm.....	159
Tabela 5.5 – Resultados de tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT de 100mm x 100mm x 100mm.....	160
Tabela 5.6 – Resultados de tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT de 125 mm x 125 mm x 100 mm.....	160
Tabela 5.7 – Resultados de tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT de 160 mm x 160 mm x 100 mm da segunda concretagem.....	161
Tabela 5.8 – Resultados de tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT de 200 mm x 200 mm x 200 mm da segunda concretagem.....	161
Tabela 5.9 – Resumo dos resultados dos ensaios da primeira concretagem.....	162
Tabela 5.10 – Resumo dos resultados dos ensaios da segunda concretagem.....	163
Tabela 5.11– Resumo dos resultados dos ensaios da terceira concretagem.....	164
Tabela 5.12 – Avaliação do ensaio através do coeficiente de variação dentro do ensaio	170
Tabela 5.13 – Análise de valores de resistência à compressão simples de corpos de prova - 3 dias Concretagem 1	171
Tabela 5.14 – Análise de valores de resistência à compressão simples de corpos de prova -5 dias Concretagem 1.....	172

Tabela 5.15 – Análise de valores de resistência à compressão simples de corpos de prova -7 dias Concretagem 1.....	173
Tabela 5.16 – Análise de valores de resistência à compressão simples de corpos de prova -28 dias Concretagem 1.....	174
Tabela 5.17 – Resumo de valores de resistência à compressão simples de corpos de prova - Concretagem 1	175
Tabela 5.18 – Resumo de valores de resistência à compressão simples de testemunhos - 3 dias Concretagem 1.....	176
Tabela 5.19 – Análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos -3 dias Concretagem 1.....	177
Tabela 5.20 – Parâmetros estatísticos da análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos -3 dias Concretagem 1.....	178
Tabela 5.21 – Análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos -5 dias Concretagem	179
Tabela 5.22 – Parâmetros estatísticos da análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos- 5 dias Concretagem 1	180
Tabela 5.23 – Análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos-7 dias Concretagem 1	181
Tabela 5.24 – Parâmetros estatísticos da análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos – 7 dias Concretagem 1	182
Tabela 5.25 – Análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos extraídos – 28 dias Concretagem 1	183
Tabela 5.26 – Parâmetros estatísticos da análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos -28 dias Concretagem 1	184
Tabela 5.27 – Resumo de valores de resistência à compressão simples de testemunhos - Concretagem 1	185
Tabela 5.28 – Resumo de valores de tensão máxima de aderência corpos de prova CAPULOT – 3 dias Concretagem 1	186
Tabela 5.29 – Análise de valores de tensão máxima de aderência corpos de prova CAPULOT – 3 dias Concretagem 1	187
Tabela 5.30 – Análise de valores de tensão máxima de aderência de corpos de prova CAPULOT – 5 dias Concretagem 1	188
Tabela 5.31 – Análise de valores de tensão máxima de aderência corpos de prova CAPULOT – 7 dias Concretagem 1	189

Tabela 5.32 – Análise de valores de tensão máxima de aderência corpos de prova CAPULOT – 28 dias Concretagem 1	190
Tabela 5.33 – Resumo de valores de tensão máxima de aderência corpos de prova CAPULOT -Concretagem 1	191
Tabela 5.34 – Análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT – 3 dias Concretagem 1	192
Tabela 5.35 – Parâmetros estatísticos para lotes da análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT – 3 dias Concretagem 1	193
Tabela 5.36 – Análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT – 5 dias Concretagem 1	194
Tabela 5.37 – Parâmetros estatísticos para lotes da análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT- 5 dias Concretagem 1.....	195
Tabela 5.38 – Análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT -7 dias Concretagem 1	196
Tabela 5.39 – Parâmetros estatísticos para lotes da análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT- 7 dias Concretagem 1dias	197
Tabela 5.40 – Análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT- 28 dias Concretagem 1	198
Tabela 5.41 – Parâmetros estatísticos para lotes da análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT -28 dias Concretagem 1.....	199
Tabela 5.42 – Resumo de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT Concretagem 1	200
Tabela 5.43 – Resumo de resultados de testes “F” e “t” às primeiras idades - Concretagem 1	201
Tabela 5.44 – Teste “F” para f_c CPs CU x f_c CPs CA	202
Tabela 5.45 – Teste “t” para f_c CPs CU x f_c CPs CA	202
Tabela 5.46 – Resumo de resultados de testes “F” e “t” às primeiras idades Concretagem 2	203
Tabela 5.47 – Resumo de resultados do testes “F” e “t” às primeiras idades Concretagem 3	204
Tabela 5.48 – Resumo de resultados do testes “F” e “t” às primeiras idades Concretagem 4	204
Tabela 5.49 – Resumo de resultados do testes “F” e “t” às primeiras idades Concretagem 5	205

Tabela 5.50 – Resumo de resultados do testes “F” e “t” às primeiras idades Concretagem 6	205
Tabela 5.51 – Resumo de resultados do testes “F” e “t” aos 28 dias Concretagem 1.....	206
Tabela 5.52 – Resumo de resultados do testes “F” e “t” aos 28 dias Concretagem 2.....	207
Tabela 5.53 – Resumo de resultados do testes “F” e “t” aos 28 dias Concretagem 3.....	207
Tabela 5.54 – Resumo de resultados do testes “F” e “t” aos 28 dias Concretagem 4.....	208
Tabela 5.55 – Resumo de resultados do testes “F” e “t” aos 28 dias Concretagem 5.....	208
Tabela 5.56 – Resumo de resultados do testes “F” e “t” aos 28 dias Concretagem 6.....	209
Tabela 5.57 – Análise estatística de resultados CAPULOT e SBPULOT nas primeiras idades.....	210
Tabela 5.58 – Análise estatística de resultados CAPULOT e SBPULOT à 28dias	211
Tabela 5.59 – Resumo geral de valores obtidos de resistência à compressão simples e de tensão máxima de aderência CAPULOT em testemunhos	213
Tabela 5.60 – Medições da maturidade em painéis Concretagem 1	219
Tabela 6.1 – Erro de estimação da resistência.....	245

LISTA DE SIGLAS

ABT: Appropriate Bond Test

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

APULOT: Appropriate Pull-out Test

ASTM: American Society for Testing and Materials

BCA: British Cement Association

CAPULOT: Cube Appropriate Pull-out Test

CEB: Comité Euro-International du Béton

CRSI: Concrete Reinforcing Steel Institute

ECBP: The European Concrete Building Project

FIB: Fédération Internationale du Béton

IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto

INTN: Instituto Nacional de Tecnología y Normalización do Paraguai

ISO: International Organization for Standardization

LEME: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

RCC: Construct and the Reinforced Concrete Council

RILEM: Réunion International des Laboratoires et Experts des Matériaux

SBPULOT: Steel Bar Pull-out Test

LISTA DE SÍMBOLOS

a : resistência ao índice de maturação $M = 1$

a/c : relação água-cimento

A_i : amplitude de cada exemplar

α : parâmetro de forma

b : declive da reta

cv_e : coeficiente de variação dentro do ensaio

d : diâmetro da barra de aço

d_2 : coeficiente fornecido da Tabela B.1 da NBR 5739:2007 (ABNT, 2007a) em função da quantidade dos corpos de prova;

d_a : diâmetro exterior da barra de ancoragem ou chumbador

Δt_i : intervalo de tempo

ε_s : deformação máxima do acero no ensaio

$\varepsilon_{s,y}$: deformação limite do acero

E_a : energia de ativação aparente

E_a : energia de ativação aparente

f_c : resistência à compressão simples

f_{ck} : resistência característica do concreto à compressão

f_{cm} : resistência à compressão média dos corpos de prova

f_k : valores característicos das resistências

F : força de tração

F_a : aderência por adesão química entre a barra e o concreto

F_{calc} : valor do teste de Ficher

F_f : aderência pela força de atrito

F_m : aderência pela ancoragem mecânica

F_{s1} : força de tração na barra, caso (a), Figura 3.16

F_{s2} : força de tração na barra, caso (b), Figura 3.16

F_{tab} : valor do teste de Ficher tabulado na Tabla A.7

H_0 : hipótese nula

k_T : constante de velocidade, em “dia⁻¹”

$l_f = l_e$: comprimento experimental de ancoragem

$M(t_n)$: fator de maturidade à idade “ t_n ”

n_1 : tamanho da amostra 1

n_2 : tamanho da amostra 2

Γ_b : coeficiente de conformação superficial mínimo

N : número de exemplares da amostra

N : número de amostras

\emptyset : diâmetro da barra

r : repetibilidade

R : reprodutibilidade

R : constante de gás universal

s : desvio padrão da amostra

s_{1-2} : estimador do desvio padrão das amostras

s_1^2 : variância da amostra 1

s_2^2 : variância da amostra 2

s_e : desvio padrão dentro do ensaio

S : resistência à idade “ t_e ”

$S_{\infty} S_{\infty}$: resistência limite

σ_c : tensões no aro de cobertura

σ_n : pressão confinante normal

σ_{st} : tensão dos estribos cruzando o plano de divisão

σ_{θ} : tensão na direção do aro

σ_L^2 : variância entre laboratórios

σ_r^2 : variância da repetitividade

σ_R^2 : variância da reprodutibilidade

t : valor fornecido pela Tabela 1 da ASTM E178-08 (ASTM, 2014)

t_n : idade do concreto

t_e : idade equivalente à temperatura de referência

t_{calc} : valor do teste de Student calculado

t_{tab} : valor do teste de Student tabelado

T : temperatura do concreto no intervalo de tempo “ Δt ”

T_1 : valor estadístico 1 do teste de normalidade

T_2 : valor estadístico 2 do teste de normalidade

T_i : média da temperatura em um intervalo de tempo “ Δt_i ”

T_O : temperatura de base

T_r : temperatura de referência

τ : uma constante de tempo

τ_b : tensão de aderência do FIB Model Code 2010 (FIB, 2010)

τ_{bd} : tensão de aderência de cálculo projeto

τ_{bk} : tensão de aderência característica estimada

$\tau_{b,m}$: tensão média de aderência

$\tau_{b,\text{máx}}$: tensão máxima de aderência

$\tau_{b,\text{máx},k}$: tensão máxima de aderência característica estimada

τ_{dm} : tensão última de aderência

τ_f : tensão final de aderência

V_c : volume de cimento

V_{cw} : volume da água capilar

V_{ec} : volume de poros capilares vazios

V_{gw} : volume da água de gel

V_p : volume dos produtos sólidos de hidratação

V_{uc} : volume do cimento não hidratado

V_w : volume da água

ν : quantidade de graus de liberdade da distribuição de Student

v_p : velocidade de carregamento

\bar{X} : média aritmética da amostra

\bar{X}_1 : média da amostra 1

\bar{X}_2 : média da amostra 2

$X_{\text{máx}}$: valor máximo da amostra

$X_{\text{mín}}$: valor mínimo da amostra

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	30
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA	30
1.2 DELIMITAÇÕES DO TEMA DA PESQUISA	33
1.3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	34
1.4 ORIGINALIDADE	35
1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	36
2 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO NAS	
PRIMEIRAS IDADES	37
2.1 MICROESTRUTURA DA PASTA DE CIMENTO.....	37
2.1.1 Hidratação do Cimento	38
2.1.2 Mecanismos da Hidratação da Alita	41
2.1.3 Porosidade da pasta	43
2.1.4 Tipos e Distribuição de Poros	44
2.2 RESISTÊNCIA DO CONCRETO	46
2.2.1 Controle de Qualidade do Concreto	46
2.2.2 Qualificação dos Laboratórios e Mão de Obra	47
2.2.3 Resistência do Concreto	48
2.2.4 Variação da Resistência do Concreto	50
2.2.5 Classificação da Resistência do Concreto	51
2.2.6 Valor Mínimo da Resistência do Concreto	54
2.2.7 Adensamento dos corpos de prova	55
2.2.8 Cura Inicial dos corpos de prova.....	56
2.2.9 Cura Não Normalizada dos CPs	60
2.2.10 Influência do Capeamento de corpos de prova cilíndricos	61
2.2.11 Controle Tecnológico Aplicado aos corpos de prova.....	63

2.3 FERRAMENTAS DE CONTROLE DA RESISTÊNCIA NAS PRIMEIRAS IDADES	64
2.3.1 Método da Maturidade do Concreto	64
2.3.1.1 Idade fictícia e energia de ativação	66
2.3.1.2 Aplicação nos canteiros de obra	68
2.3.1.3 Limitações do Método da Maturidade	69
2.3.2 Ensaios Não Destrutivos para Averiguação da Resistência nas Primeiras Idades	70
2.3.2.1 Ensaio esclerométrico	70
2.3.2.2 Métodos de emissão acústica e de ultrassom	71
2.3.2.3 Método <i>Pull-Out</i>	74
2.3.3 Novos Ensaios para Averiguação da Resistência nas Primeiras Idades	78
3 RELAÇÃO ENTRE ADERÊNCIA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	81
3.1 INTRODUÇÃO	81
3.2 INÍCIO DO CONCRETO ARMADO E ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO	81
3.3 TIPOS DE AÇO PARA CONCRETO NA EUROPA E NOS EUA NO INÍCIO DO CONCRETO ARMADO	88
3.4 MECANISMO DA ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO	89
3.5 EQUILÍBRIO DAS TENSÕES	91
3.6 DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES	93
3.7 ENSAIO DE ARRANCAMENTO DIRETO (<i>PULL-OUT TEST</i>)	96
3.8 ADERÊNCIA E FENDILHAMENTO	100
3.9 ENSAIO <i>PULL-OUT</i> E FENDILHAMENTO	102
3.10 RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO E ADERÊNCIA	104
3.11 PROJETO APULOT	106

3.12 AVANÇO DAS PEQUISAS APULOT	110
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	113
4.1 INTRODUÇÃO	113
4.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	113
4.3 ETAPA 1: ENSAIOS DE LABORATÓRIO	114
4.3.1 Descrição dos Trabalhos	114
4.3.2 Quantidade de Ensaio s	116
4.3.3 Execução do Experimento	116
4.3.4 Equipamentos de Ensaio	119
4.4 ETAPA 2: ENSAIOS EM ESCALA REAL	124
4.4.1 Definição das Categorias de Resistência	124
4.4.2 Definição dos Ensaio s	125
4.4.3 Definições dos Tipos de Cura	129
4.4.4 Quantidade de Ensaio s e Medições	131
4.4.5 Execução dos Experimentos	134
4.4.5.1 Execução dos painéis	134
4.4.5.2 Moldagem de corpos de prova	142
4.4.5.3 Identificação e cura de corpos de prova	145
4.4.5.4 Execução de ensaio s	147
4.4.5.4.1 <i>Extração, corte e ensaio s à compressão simples dos testemunhos</i>	147
4.4.5.4.2 <i>Ensaio s à compressão simples de CPs</i>	151
4.4.5.4.3 <i>Controle de maturidade</i>	151
4.4.5.4.4 <i>Ensaio s SBPULOT</i>	154
4.4.5.4.5 <i>Ensaio s nos painéis</i>	155
4.4.5.4.6 <i>Ensaio s CAPULOT</i>	156
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	157
5.1 INTRODUÇÃO	157
5.2 ETAPA 1: RESULTADOS DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO	157
5.2.1 Conclusões da Etapa 1.....	162

5.3 ETAPA 2: RESULTADOS DE ENSAIOS EM ESCALA REAL.....	165
5.3.1 Fundamentos Estatísticos Empregados	165
5.3.1.1 Teste de normalidade	165
5.3.1.2 Teste “F” de diferenças entre as variâncias	166
5.3.1.3 Teste “t” de diferenças entre as médias	167
5.3.2 Resultados da Análise Estatística	168
5.3.2.1 Resistência à compressão simples de corpos de prova moldados	169
5.3.2.2 Resistência à compressão simples de testemunhos extraídos dos painéis	175
5.3.2.3 Tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT.....	185
5.3.2.4 Tensão máxima de aderência em painéis SBPULOT	191
5.3.2.5 Contrastes de variâncias e médias das amostras	200
5.3.2.5.1 <i>Contraste de resultados às primeiras idades (3, 5 e 7 dias)</i>	201
5.3.2.5.2 <i>Contraste de resultados aos 28 dias</i>	206
5.3.2.6 Relação entre ensaios em moldes CAPULOT e in-loco SBPULOT.....	210
5.3.2.7 Análise de correlação simples	212
5.3.2.8 Medições de maturidade em painéis	219
5.3.2.9. Relação temperatura ambiente e maturidade do concreto.....	221
6 IMPLEMENTAÇÃO DE ENSAIOS EM CANTEIROS DE OBRA...	223
6.1 CANTEIRO DE OBRA 1	224
6.2 CANTEIRO DE OBRA 2	229
6.3 CANTEIRO DE OBRA 3	232
6.4 CANTEIRO DE OBRA 4	234
6.5 CANTEIRO DE OBRA 5	235
6.6 CANTEIRO DE OBRA 6	238
6.7 CANTEIRO DE OBRA 7	240
6.8 RESULTADOS DE ENSAIOS EM CANTEIROS DE OBRA.....	243
6.8.1 Controle de maturidade.....	243
6.8.2 Resultados da estimação.....	243

6.8.3 Conclusões sobre a logística na implementação do CAPULOT em canteiros de obra.....	246
7 CONCLUSÕES.....	248
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	251

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é realizada uma contextualização e justificativa do tema de estudo da tese. Em seguida são apresentadas as delimitações da pesquisa, os objetivos gerais e específicos. Também é indicada a originalidade do estudo e, por fim, um resumo da estrutura adotada para o trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA

Na atualidade a população tem um ritmo acelerado e quem constrói quer o prédio pronto no menor prazo possível. Ficou no passado, o sistema de construção civil onde o avanço da construção era feito de uma laje a cada 21 dias. Hoje a pressão do mercado imobiliário exige que o edifício suba o mais rápido possível, para que os potenciais clientes possam observar que a propaganda do imóvel corresponda à realidade e que a venda do mesmo se torne realidade e, então, fechem o contrato de compra de um apartamento.

Em resposta a situação acima descrita, no ano 1997 foram feitas as primeiras edificações com protensão não aderente, coincidindo com início da fabricação das cordoalhas engraxadas e plastificadas no Brasil (DE MOURA, 2002). Em 2011 aconteceu na cidade de Vitória-ES, um evento sobre o sistema construtivo de lajes planas tensionadas, reunindo 25 empresas construtoras de diversos estados do país. Neste encontro já se destaca a afirmação de algumas empresas de que “a protensão é feita em 100 % no 3º dia, quando o concreto atinge o mínimo de 20 MPa, retirando-se 100 % do escoramento logo em seguida” (TAMAKI, 2011)

Em 2013 foi registrada uma elevação do consumo de fios e cordoalhas, tanto para o setor de pré-fabricados de concreto, quanto para o mercado de edifícios e em obras de infraestrutura. Além disso, houve investimento de algumas companhias, tendo como objetivo a duplicação da capacidade de produção de cordoalhas, especialmente as engraxadas e plastificadas. (DE ALMEIDA, 2014). Hoje a adoção deste tipo de tecnologia na construção teve um crescimento muito importante.

Em função do exposto ficam as questões: seria possível realmente retirar 100 % do escoramento no terceiro dia, quando o concreto atinge sua resistência de projeto? como ter certeza de qual é a resistência do concreto *in loco* para evitar a fissuração do concreto no

momento da protensão? Considerando o caso de que a protensão se realize e o concreto não tenha o valor previsto, acontecerão fissuras e esmagamento?

Sabe-se que a norma brasileira NBR 5738:2015a (ABNT, 2015a) prevê a moldagem e a cura dos corpos de prova (CPs) para a realização dos ensaios de propriedades mecânicas do concreto e indica que, durante pelo menos as primeiras vinte e quatro horas, os CPs devem ser armazenados em local protegido de intempéries, e depois, passar para a câmara úmida ou em uma solução saturada de hidróxido de cálcio. Por outro lado, o ensaio à compressão simples dos CPs de acordo com NBR 5739:2007a (ABNT, 2007a) deve respeitar limites de tempo, sendo que, no caso do ensaio aos três dias, indica duas horas após a retirada dos CPs da cura. Dar cumprimento à especificações nas primeiras idades leva a uma situação onde o processo real de cura dos CPs é muito baixo e o valor de ruptura dos CPs pode não ser muito representativo da situação real da estrutura. Além disso, a resistência real do concreto *in loco* da estrutura é diferente da resistência dos CPs mantidos em câmara úmida. Segundo Fusco (2013) esta relação é de 0,85.

As técnicas de avaliação da resistência à compressão e do desempenho de estruturas de concreto se referem principalmente a uma combinação de ensaios não destrutivos e destrutivos, tais como os ensaios de esclerometria, ensaios de ultrassom e a extração de testemunhos. Numa primeira etapa esses ensaios são feitos na estrutura e posteriormente em laboratório onde se realiza o ensaio de resistência à compressão, além dos outros ensaios sobre o testemunho, antes de sua ruptura. Entretanto, os resultados dos ensaios nas primeiras idades são muito influenciados pela maturidade do concreto e sua realização têm muitas restrições. A norma brasileira ABNT NBR 7584:2012 recomenda que o ensaio de esclerometria não deve ser realizado com menos de quatorze dias; a NBR 8802:2013 assinala a idade do concreto entre os fatores que influenciam nos resultados dos ensaios de ultrassom. Em relação aos testemunhos a NBR 7680-2:2015b indica que os testemunhos devem ser mantidos em condições de laboratório no mínimo de setenta e duas horas antes do ensaio.

As determinações da Norma Brasileira são muito similares às das normas europeias e americanas, e são aprofundadas em bibliografia específica sobre o assunto. Segundo Bungey (2006), a maturidade pode ser utilizada para a medição dos efeitos da temperatura no tempo de crescimento da resistência do concreto, embora não em forma isolada para a detecção de problemas na concretagem. Além disso, pelo fato das medições serem pontuais dentro da

estrutura, podem existir limitações. A correlação entre a resistência e a maturidade é diferente para cada composição e tipo de cura do concreto.

Neste contexto, Bungey (2005) descreve a iniciativa criada na Inglaterra pela *British Cement Association (BCA)*, para o *Construct and the Reinforced Concrete Council (RCC)* visando melhorar o desempenho da indústria do concreto, conhecido como *The European Concrete Building Project (ECBP)*. O programa envolveu a elaboração e a realização de ensaios para a determinação da resistência *in loco* em quatro edifícios de grande escala: uma construção convencional de concreto, um edifício de concreto pré-moldado, um edifício de concreto híbrido e um edifício de concreto armado e com desenho inovador. Uma área do estudo foi a determinação da resistência do concreto *in loco* às primeiras idades. Um dos reportes baseados na investigação é a *Best Practice Guides for in-situ Concrete Frame Buildings* (2000), onde assinala-se que o ensaio de arrancamento de pino *pull-out test (POT)* é o método recomendado, baseado na forte correlação entre a força de arrancamento e a resistência à compressão do concreto. O ensaio é feito por meio de um disco metálico com haste, colocado prévio à concretagem. Após endurecido o concreto, aplica-se uma força no haste para arrancar o disco metálico. As normas ASTM C900-15 e UNE-EN 12504-3:2006 apresentam detalhes do ensaio.

Lorrain e Barbosa (2008), tomando como base o ensaio de aderência *POT* e a relação existente entre resistência à compressão do concreto e a tensão de aderência propuseram o ensaio, que recebeu a denominação de *Appropriate Pull-Out Test (APULOT)*, visando a partir do ensaio de aderência obter a resistência à compressão do concreto no próprio canteiro de obra.

O APULOT vem sendo aprimorado com base em investigações de iniciação científica, mestrado e doutorado em diversos laboratórios de pesquisas no Brasil e no exterior. Dentre eles, destaca-se o trabalho de mestrado de Silva (2010) e posteriormente de doutorado de Silva (2014) e o trabalho de García-Taengua et al. (2013).

O presente trabalho é uma das derivações da proposta inicial do APULOT, no qual se procura estabelecer uma recomendação para um novo ensaio que possa ser implantado e vir a ter sucesso nos canteiros de obra do mundo, visando validar, padronizar e consolidar os ensaios em condições reais, para a determinação da resistência *in loco* do concreto nas primeiras idades.

1.2 DELIMITAÇÕES DO TEMA DA PESQUISA

Como enfatizado no item anterior, a determinação correta da resistência à compressão na própria estrutura, nas primeiras idades, é fundamental para acelerar o processo construtivo. Dentre os equipamentos existentes para a realização do ensaio de arrancamento estão o *equipment for pull-out testing on concrete* ou simplesmente *pull-out test apparatus* onde o arrancamento é feito através de uma barra de aço de 6,3 mm, e o LOK-TEST onde o arrancamento é feito de um disco de aço composto de uma barra de aço que, da mesma maneira que no caso anterior, é colocada antes da concretagem. Os fabricantes fornecem uma curva de calibração para obter a resistência do concreto nos dois equipamentos.

Segundo a ASTM C900-15 uma correlação prévia deverá ser realizada antes do uso de cada tipo de equipamento de arrancamento, com o tipo do concreto que está sendo testado, enquanto a UNE-EN 12504-3: 2006 apresenta uma curva típica que pode ser utilizada de acordo a uma determinada classe de resistência.

Quanto ao ensaio APULOT, de maneira geral, pode-se afirmar que as diversas investigações foram feitas com a moldagem do concreto em garrafas pet de diversos diâmetros e vários diâmetros de barras de aço, trabalhos no laboratório e fazendo a correlação com a ruptura à compressão dos CPs. Destaca-se o trabalho de Lorrain et al. (2011), que fornece uma curva de calibração entre a tensão máxima de aderência e a resistência à compressão.

Com o desenvolvimento da presente pesquisa, busca-se prover informações que auxiliem a estabelecer respostas para as seguintes perguntas:

- a) qual é o valor de cobrimento do concreto ao redor da barra, que possa evitar o fendilhamento do concreto?
- b) qual é o tipo de molde mais adequado para garantir uma uniformidade aceitável dos resultados dos ensaios?
- c) é possível aprimorar a curva de correlação entre a tensão de aderência e a resistência à compressão do concreto, proposta por Lorrain e Barbosa (2008)?
- d) pode o ensaio APULOT representar o que acontece em escala real em quanto à resistência à compressão *in loco*?

Evitar o fendilhamento do corpo de prova é importante porque apenas são válidos os dados gerados a partir do deslizamento da barra. A pesquisa ora proposta contempla a investigação de diferentes cobrimentos, com o mesmo comprimento de ancoragem e o mesmo diâmetro da barra de aço em concretos com diferentes resistências, ensaiados às primeiras idades, quer seja em laboratório como em painéis de concreto e canteiros de obras.

1.3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem como objetivo principal determinar a resistência à compressão do concreto *in loco* nas primeiras idades. Para isto é necessário analisar, avaliar e validar o uso do ensaio APULOT em canteiros de obras, para decidir quando fazer: a retirada do escoramento, a aplicação de cargas ou de protensão não aderente nas primeiras idades.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- a) desenvolver e fabricar um molde específico para o APULOT, que proporcione rapidez e facilidade no processo de moldagem e desmoldagem;
- b) analisar a influência do processo da cura e das condições ambientais de vento e temperatura nos resultados da tensão máxima de aderência;
- c) determinar o momento certo para a realização do ensaio de arrancamento pelo uso de medições da maturidade no concreto;
- d) comparar os resultados dos ensaios feitos em corpos de prova APULOT e ensaios de arrancamento de barras de aço em painéis de concreto;
- e) obter uma curva de correlação entre tensão máxima de aderência e resistência do concreto, para uma faixa usual da resistência em estruturas de concreto armado e protendido;
- f) avaliar os aspectos técnicos e práticos para uma adequada implementação do APULOT em canteiros de obras;
- g) testar a curva de correlação com os resultados obtidos até o momento nas diversas pesquisas feitas.

Para cumprir com os objetivos indicados, foi realizada a experimentação em três etapas que se indicam a seguir, conforme fluxograma da Figura 1.1.

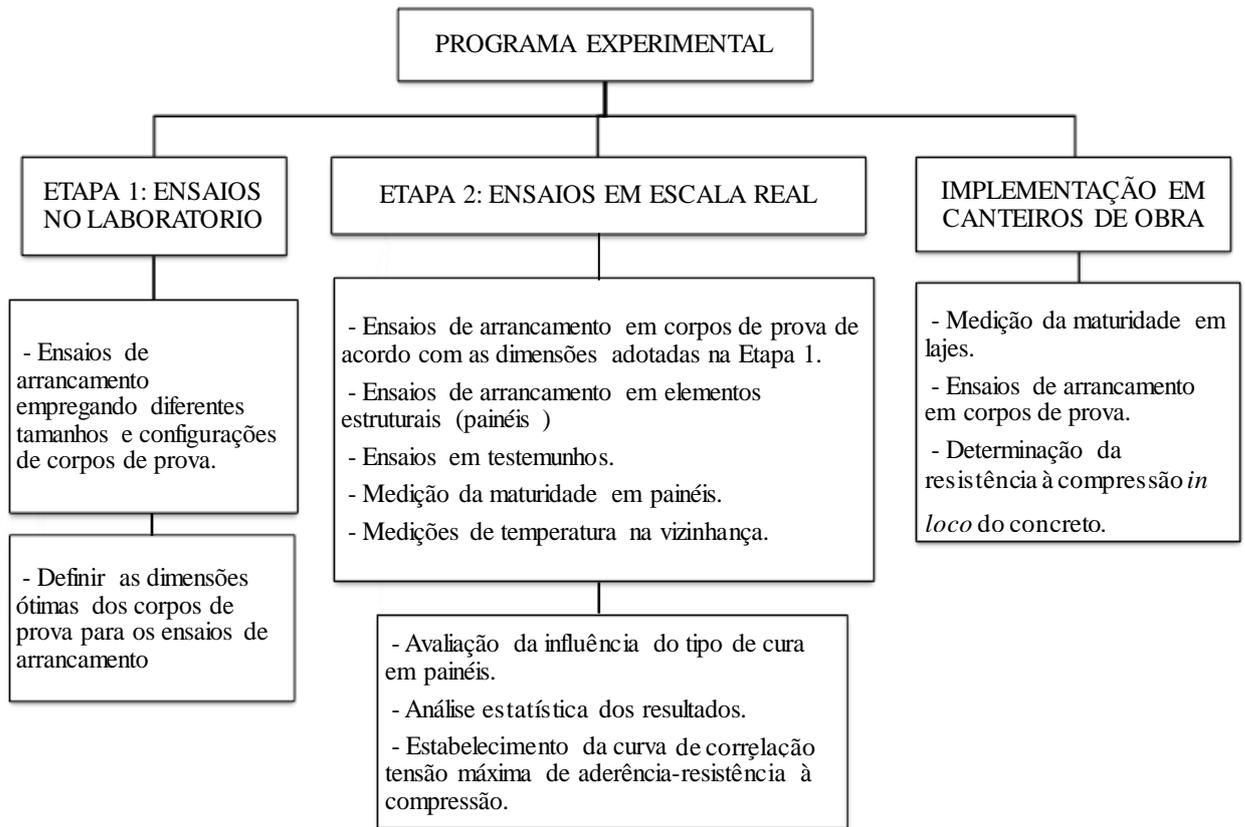


Figura 1.1 – Fluxograma do planejamento do experimento

1.4 ORIGINALIDADE

A presente pesquisa, na qual se fundamentou esta tese, tem como originalidade a conjunção da investigação experimental da relação entre a resistência à compressão simples de testemunhos extraídos de painéis de concreto e a tensão máxima de aderência obtida em corpos de prova APULOT.

Outro aspecto de originalidade é a medição de maturidade do concreto nos painéis, que vai permitir conhecer o momento certo para fazer o teste de arrancamento.

Finalmente é feita pela primeira vez a comparação dos resultados da tensão máxima de aderência em corpos de prova APULOT e ensaios feitos sobre painéis de concreto, que têm similitude com a realidade de uma laje.

1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi estruturado em sete capítulos, referências bibliográficas e sete apêndices, compondo dois volumes, sendo o segundo volume constituído pelos apêndices.

O capítulo um consta de uma introdução, abordando a importância e justificativa do tema estudado, os objetivos, a originalidade e a delimitações do tema da pesquisa.

O capítulo dois é dedicado à revisão bibliográfica, mostrando o estado da arte no mundo sobre a avaliação da resistência à compressão do concreto nas primeiras idades, sobre o cumprimento da resistência de projeto e sobre o método da maturidade do concreto.

No capítulo três é apresentada a relação entre tensão de aderência e resistência à compressão do concreto, fazendo um histórico da metodologia, das linhas de pesquisa e dos experimentos realizados, apresentando o projeto APULOT na mesma direção.

No capítulo quatro é detalhado o programa experimental, enfatizando-se o seu planejamento às variáveis em análise e às características dos concretos e procedimentos de ensaios empregados.

No capítulo cinco são apresentadas a análise estatística dos dados, discutindo-os e analisando-os sobre diversas vertentes.

No capítulo seis é apresentada a implementação do ensaio em canteiros de obra.

No capítulo sete são apresentadas as conclusões desta pesquisa, constando as considerações finais, as conclusões, a transferência do conhecimento do novo ensaio ao meio técnico e as sugestões para estudos futuros relacionados ao tema em apreço.

Seguem-se as referências bibliográficas concluindo o primeiro volume.

Nos APÊNDICES A a F, constam as análises estatísticas das resistências à compressão da Etapa 2.

No APÊNDICE G consta a implementação nos canteiros de obra.

2 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CONCRETO NAS PRIMEIRAS IDADES

Este capítulo está dividido em três partes: a primeira descreve o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, a segunda parte explica a importância do controle da resistência do concreto, fazendo uma descrição sobre os fatores que afetam a resistência, por fim a última parte faz uma resenha das ferramentas disponíveis para a medição da influência dos fatores assinalados.

2.1 MICROESTRUTURA DA PASTA DE CIMENTO

O tema em questão é muito importante, desde que se precise conhecer qual é valor da resistência em um momento determinado. Providakis et al. (2011) diz que uma das razões principais das falhas acontecidas durante a fase da construção de uma estrutura de concreto é a sobreestimação da resistência nas primeiras idades, submetendo a estrutura a cargas que ainda não tem condições de suportar. Além disso, comentam que a hidratação inicial do concreto fresco acontece nos primeiros três dias, período no qual o concreto adquire resistência e a superfície fica seca.

No caso de concreto dosado em centrais, o primeiro contato do cimento com a água acontece na central, quando inicia a hidratação do cimento. Depois de alguns minutos ou horas o caminhão betoneira chega ao canteiro de obras e, finalmente, o concreto é descarregado e adensado. A evolução da resistência inicial está relacionada com esse processo.

De acordo com Benz et al. (2009) o fator que mais influencia a qualidade do concreto é a relação (a/c). Sua relação com a resistência é conhecida desde os primeiros dias da história do concreto, devido aos trabalhos de Rens Feret em 1897 e Duff Abrams em 1918. Esta influencia se deve pois ao fator a/c é que controla o volume de água disponível para a hidratação do cimento e também estabelece o espaço inicial entre as partículas do cimento, que também vai influenciar muitas das propriedades do concreto nas primeiras idades.

Ressaltando a importância da hidratação do cimento, Benz et al. (2009) assinalam que ela é responsável de fazer a transformação do concreto de um material viscoso em suspensão para um material rígido e durável.

O tempo necessário para o desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto varia de acordo com os materiais utilizados, especialmente o tipo, classe e consumo de cimento.

2.1.1 Hidratação do Cimento

Desde muito tempo atrás, conforme assinalam Brunauer e Copeland (1952), mencionados por Metha e Monteiro (2014), é considerado que a química do concreto é essencialmente a química da reação entre cimento Portland e a água.

Hoje a evolução dos métodos de avaliação da hidratação do cimento teve um crescimento muito importante, onde o auxílio de ferramentas computacionais tem marcada influência. A Figura 2.1 da imagem 3D tomada de Thomas et al. (2011) mostra os produtos da hidratação de uma pasta de cimento.

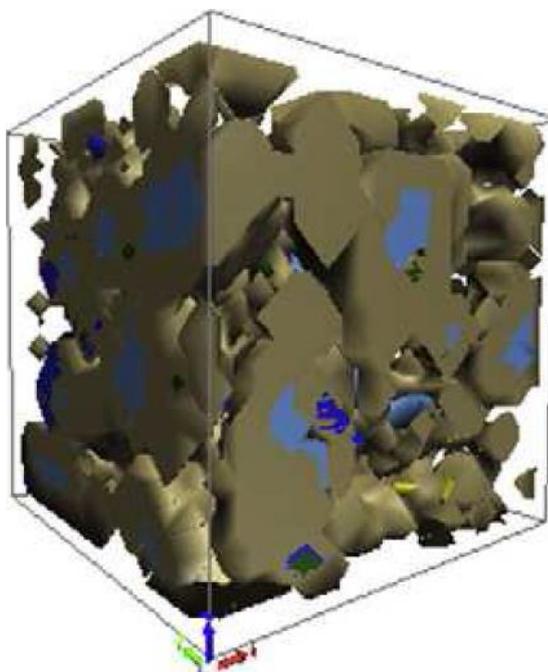


Figura 2.1 – Imagem da microestrutura depois de 180 minutos do início da hidratação, onde o azul claro é C_3S , o azul forte é hidróxido de cálcio, o marrom é C-S-H, o cinza é C_3A , o verde é etringita e o amarelo é gipsita (THOMAS et al., 2011)

De acordo a Bullard et al. (2011), o estudo da hidratação do cimento tem um interesse prático, desde o ponto de vista de procurar obter concretos mais sustentáveis, para o qual a utilização dos resíduos das indústrias é uma opção correta. Os estudos nessa direção poderão definir a dosagem adequada, a quantidade da adição, o tipo e quantidade do aditivo, entre outros parâmetros.

Na mesma direção, Kolver e Rousell (2011) dizem que o uso da escoria e adições pozolânicas no concreto é muito importante e tem um crescimento dia a dia. Os materiais cimentantes suplementarios (SCM-Supplementary Cementitious Materials) hoje são uma parte componente da dosagem dos concretos da alta resistência e alto desempenho. Sílica ativa, casca do arroz e metacaulin são alguns dos (SCM) que são usados no concreto, melhorando a qualidade e durabilidade.

Conforme Neville e Brooks (2013), os componentes principais do cimento antes do início da hidratação são indicados no quadro da Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Componentes principais do cimento antes do início da hidratação (NEVILLE; BROOKS, 2013)

Componente	Fórmula química	Nomenclatura
silicato tricálcico “α” (alita)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ Ca_3SiO_5	C_3S
silicato dicálcico “β” (belita)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ Ca_2SiO_4	C_2S
aluminato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	C_3A
ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	C_4AF

Segundo Tennis e Jennings (2000), depois de uma extensa pesquisa feita nos E.E.U.U. com cimentos Tipo I por Gebhard (1994), a distribuição do volume dos componentes desde o cimento anidro até a pasta de cimento hidratado é a seguinte, para uma relação *a/c* de 0,5, conforme Figura 2.2:

- a) 55 % de C_3S ;
- b) 18 % de C_2S ;
- c) 10 % de C_3A ;

d) 8 % de C₄AF.

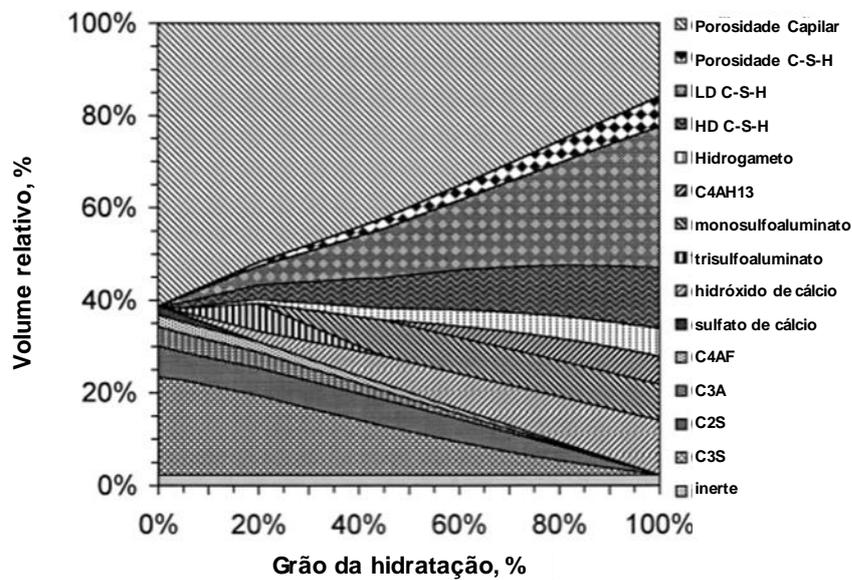


Figura 2.2 – Volume relativo de cada uma das fases como função do grau da hidratação (GEBHARD, 1994)

Por outro lado, os valores médios típicos da composição de compostos de diferentes tipos de cimento Portland, indicados em Neville e Brooks (2013), são mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Valores médios típicos da composição de diferentes tipos de cimentos

Tipo de cimento	Composição de compostos (%)							
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	CaO livre	MgO	Perda ao fogo
I	59	15	12	8	2,9	0,8	2,4	1,2
II	46	29	6	12	2,8	0,6	3,0	1,0
III	60	12	12	8	3,9	1,3	2,6	1,9
IV	30	46	5	13	3,9	0,3	2,7	1,0
V	43	36	4	12	2,7	0,4	1,6	1,0

(fonte: NEVILLE; BROOKS, 2013)

Depois da análise da Figura 2.3 e da Tabela 2.2, pode-se concluir a importância que tem a alita, já que representa entre um 50 % e 70 % do peso de cimento e também tende a dominar o período inicial da hidratação. É por essa razão conforme Bullard et al. (2011) que o estudo da hidratação está encaminhado para o estudo da alita.

2.1.2 Mecanismos da Hidratação da Alita

De acordo a Bullard et al. (2011), a hidratação implica uma série de processos de acoplamentos químicos que podem ser classificados nas seguintes etapas:

- a) **dissolução**, que é o destacamento de unidades moleculares (UM) da superfície;
- b) **difusão**, que são os componentes da solução transportados pelo volume de poros da pasta de cimento ou ao longo da superfície do sólido;
- c) **crescimento**, que é a incorporação de UM na estrutura de um sólido cristalino amorfo na sua camada de auto-absorção;
- d) **nucleação**, que é a precipitação de sólidos heterógenos ou superfícies sólidas na solução;
- e) **formação de complexos**, que é a reação entre os íons simples para formar íons complexos absorvidos em superfícies sólidas;
- f) **absorção**, que é a acumulação de íons ou outras UM com uma interface, tal como a superfície de uma partícula sólida num líquido.

Todas as etapas não acontecem em forma sequencial e, por tanto, existem etapas que se desenvolvem em forma paralela e por isso os processos são complexos.

Mostrando a evolução da alita em função do tempo, Bullard et al. (2011) apresentam o seguinte modelo simplificado apresentado na Figura 2.3.

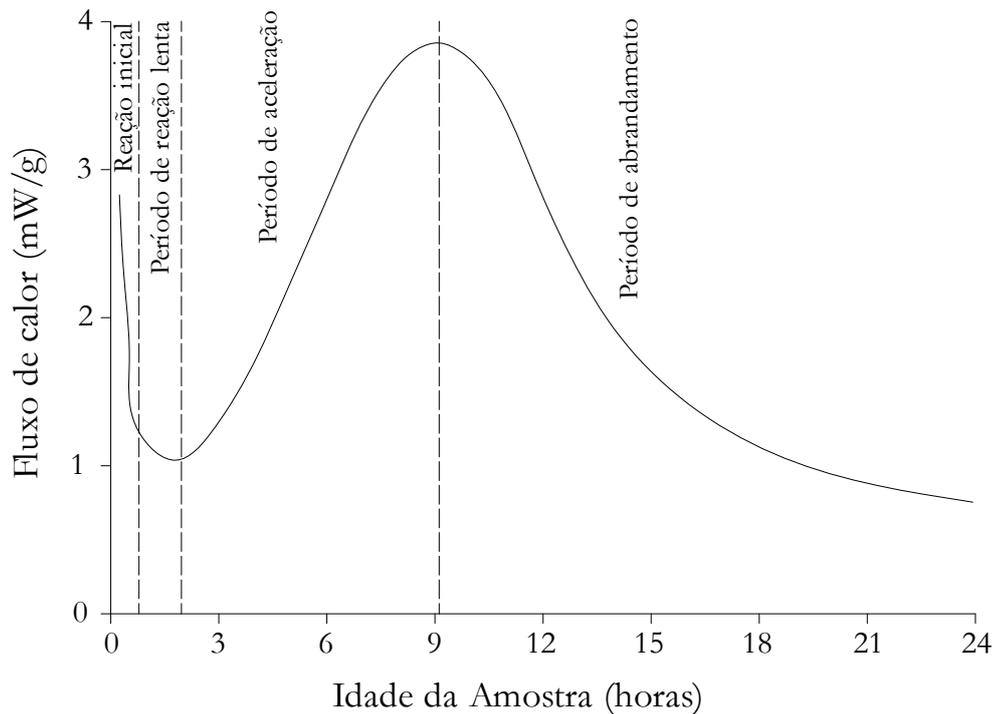


Figura 2.3 – Taxa da hidratação da alita em função do tempo (baseado em: BULLARD et al., 2011)

Nos primeiros segundos se desenvolve muito calor, em função da unidade obtida pelo contato com a água e a dissolução do C_3S .

Depois se apresenta uma etapa de desaceleração e baixa reação, uma das explicações da causa da desaceleração é que se forma uma camada fina, contínua e metaestável. Essa barreira restringe o acesso da água e a difusão de íons e é mantida até atingir o equilíbrio com a solução, no final do período.

No final do período da baixa reação, é iniciado o período de aceleração, o consenso geral é que esta fase encontra-se vinculada com a nucleação e o mecanismo de crescimento (N + G). O comportamento indica que a velocidade da hidratação, nesta fase, depende da quantidade de alguns produtos da hidratação, presumivelmente o C-S-H.

Finalmente se apresenta o período da desaceleração, nesta fase ainda tem poucos estudos quantitativos assinala Bullard et al. (2011) e indica alguns fatores que têm influência como a utilização de partículas pequenas, deixando apenas as partículas grandes reagir, a falta de espaço e a falta de água.

2.1.3 Porosidade da pasta

A pasta de cimento fresca é uma rede plástica de partículas de cimento dispersas em água, mas, uma vez que a pega tenha ocorrido, seu volume aparente ou total permanece constante (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A Figura 2.4 ilustra as proporções, em volume, dos constituintes da pasta de cimento antes e durante a hidratação do cimento.

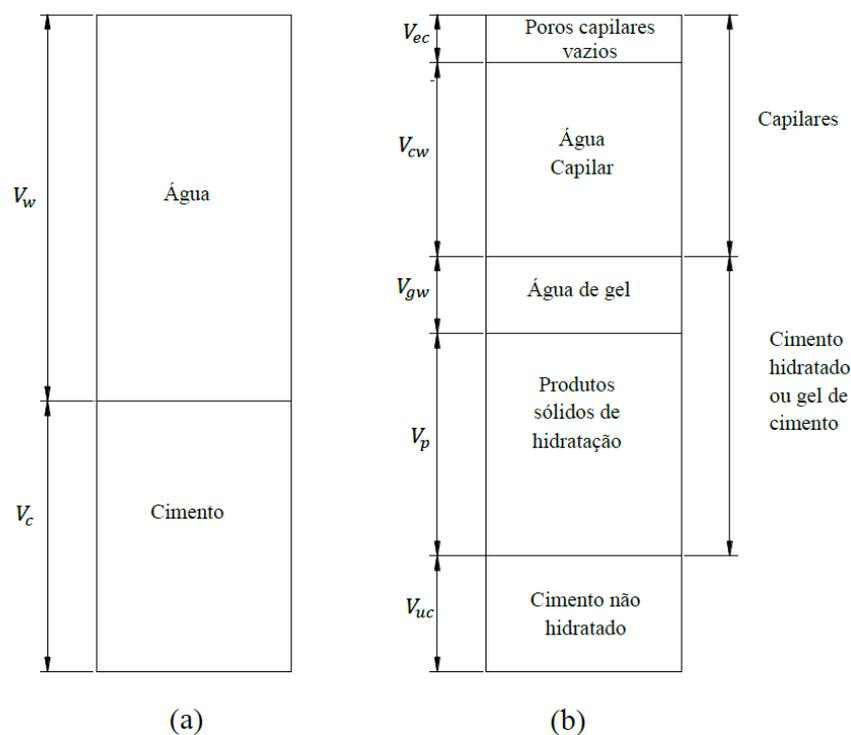


Figura 2.4 – Representação esquemática das proporções volumétricas: (a) antes da hidratação e (b) durante a hidratação (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Segundo Neville e Brooks (2013), o cimento hidratado ou gel de cimento consiste em produtos sólidos da hidratação mais a água que é retida fisicamente ou é adsorvida nas grandes superfícies dos hidratos. Essa água é denominada água de gel e está localizada entre os produtos sólidos da hidratação, nos chamados poros de gel (espaços interlamelares).

Além da água de gel, existe a água que é combinada química ou fisicamente com os produtos da hidratação e é, portanto, fortemente retida, ela representa normalmente cerca de 23 % da massa de cimento anidro.

Sendo assim, os produtos sólidos hidratados ocupam um volume menor que a soma dos volumes absolutos do cimento anidro original (que hidratou) e da água combinada; conseqüentemente, há um espaço residual no interior do volume total da pasta. O espaço residual forma poros capilares, que podem estar vazios ou cheios de água, dependendo da quantidade de água de amassamento original, bem como do ingresso de água adicional durante a hidratação.

2.1.4 Tipos e Distribuição de Poros

Segundo o GEHO-CEB (1991) e Sanchez (2011) os poros no concreto estão constituídos pelos microporos, poros capilares e macroporos, cujos tamanhos são mostrados na Figura 2.5.

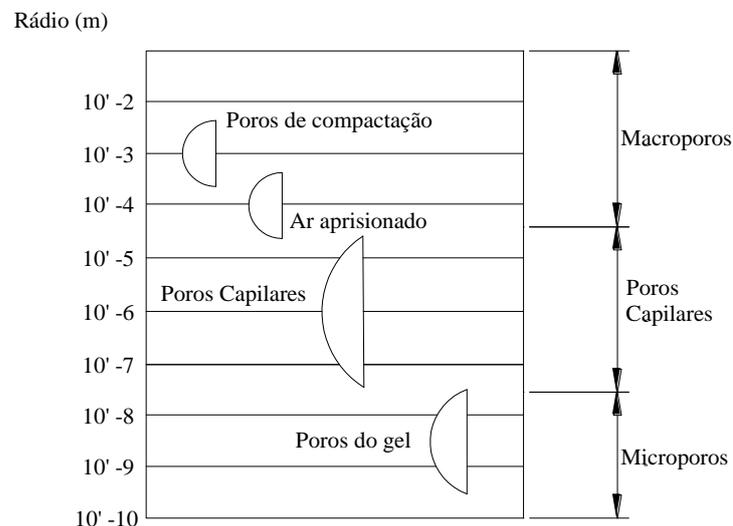


Figura 2.5 – Esquema da distribuição do tamanho dos poros no concreto (baseado em: GEHO-CEB, 1991).

Microporos são constituídos pelos poros de gel decorrentes da reação química do cimento com a água de hidratação. Esses poros são de minúsculas dimensões, isolados, não permitem percolação de fluidos por seu intermédio e, portanto, não participam dos mecanismos de degradação do concreto (FUSCO, 2013).

Poros capilares são os que formam uma rede de canais intercomunicantes ao longo de toda a massa de concreto, decorrentes essencialmente da evaporação do excesso de água de amassamento. Após o endurecimento do concreto, parte dessa água evapora, ficando uma rede capilar com os poros menores saturados de água, e os maiores contendo ar e vapor no seu interior e uma película de água adsorvida a longo de suas paredes (FUSCO, 2013).

Macroporos são compostos pelos poros devidos à compactação do concreto, que são decorrentes do atrito existente entre os grãos dos agregados e entre estes e as fôrmas para a concretagem, e pelos poros de ar aprisionado, que são resultantes do próprio processo da mistura da massa de concreto na betoneira, estando dispersos na forma de minúsculas bolhas (FUSCO, 2013).

Os macroporos são admitidos como prejudiciais à resistência e à impermeabilidade, enquanto vazios menores do que 50 nm, referidos como microporos, são admitidos como mais importantes para a retração por secagem e a fluência (METHA; MONTEIRO, 2014).

Com relação à distribuição dos poros, Ma e Li (2013) obtiveram a Figura 2.6, que mostra a variação dos diâmetros dos poros na pasta de cimento com uma relação $a/c = 0,5$ com relação à idade, onde os diâmetros foram determinados pelo método de porosimetria intrusão de mercúrio (MPIM).

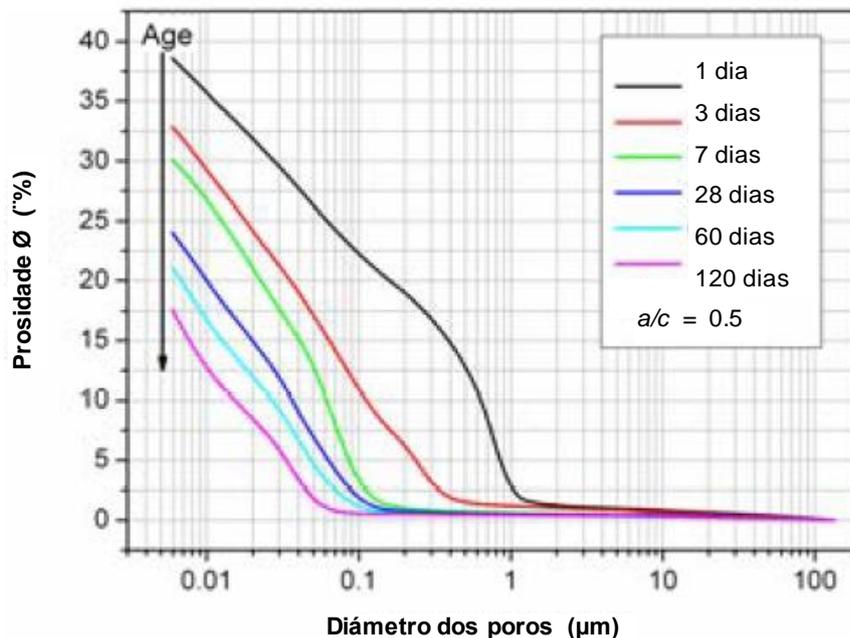


Figura 2.6 – Distribuição do tamanho do poro na pasta de cimento com $a/c = 0,5$ (baseado em MA; LI, 2013)

Em relação à influência da idade e da relação a/c no tamanho e na distribuição dos poros na pasta de cimento, Kondraivendhan e Bhattacharjee (2010) demonstraram, também pelo método

de porosimetria intrusão de mercúrio, que a dispersão de tamanho dos poros torna-se menor com a idade e também com uma diminuição na relação a/c . Por outro lado, os autores apresentam um modelo matemático que permite fazer uma estimativa da resistência da pasta de cimento, a partir da informação da relação a/c , da idade e da finura do cimento.

2.2 RESISTÊNCIA DO CONCRETO

Neste item, são apresentados diversos tópicos associados à resistência do concreto.

2.2.1 Controle de Qualidade do Concreto

O concreto continua sendo um dos principais materiais utilizados nas estruturas, alcançando nas últimas décadas um elevado domínio de seu comportamento estrutural por parte dos projetistas através de elevada sofisticação dos processos de dimensionamentos, obtidos principalmente com o uso da informática.

Atualmente as edificações com protensão não aderente tiveram um crescimento muito importante com relação às estruturas convencionais de concreto armado e elas apresentam vantagem em relação ao concreto convencional, como a possibilidade de vencer vãos bem maiores. Para o mesmo vão consegue-se significativa redução na altura da viga, a redução das quantidades de concreto e aço.

Embora durante a operação de protensão, os materiais são submetidos a tensões geralmente superiores às que poderão ocorrer durante a vida útil da estrutura, o que funciona como uma prova de carga e por tanto o concreto precisa melhor controle de execução.

Quanto ao controle da qualidade do concreto, muitas vezes, o pessoal não tem um adequado cuidado do processo desde amostragem NBR 5738:2015a, passando pela cura inicial o transporte ao laboratório, para seu rompimento de acordo a NBR 5739:2007a. Comprovando o que foi mencionado, uma investigação a respeito da resistência à compressão de concretos usinados produzidos no Brasil, a partir de uma base de dados com mais de seis mil corpos de prova (CPs) moldados in loco mostrado na Tabela 2.3, no recebimento do concreto (SANTIAGO, 2011), verificou-se que a questão da não-conformidade atinge grande parte dos concretos produzidos no país e que o porcentual de concretos não-conformes aumenta com o aumento da classe de resistência do concreto.

Tabela 2.3 – Quantidade de corpos de prova por classe de resistência e percentual de concretos não conformes

Classes	Número de CPs analisados	CPs não conformes (%)
C20	1255	1
C30	1233	9
C40	3925	28
C50	148	84

(fonte: SANTIAGO, 2011)

Mesmo que, de acordo com o Código de Defesa do Consumidor (CDC), seja obrigatório o respeito às normas técnicas brasileiras elaboradas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e sua desobediência corresponde a uma infração, ocasionando as sanções cabíveis, a situação é frequente na realidade das construções no país e por isso a Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE) disponibiliza no seu site recomendações sobre a forma de proceder no caso de concretos não conformes.

A falta de observação das normas, bem como deficiências no material e na mão de obra, aliadas à eventual negligência dos construtores, podem ocasionar vícios e defeitos construtivos.

2.2.2 Qualificação dos Laboratórios e Mão de Obra

A indústria da construção civil, em atendimento à norma NBR 12655:2015c, contrata laboratórios para realizar os ensaios de controle de aceitação do concreto destinado às estruturas. Assim, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) credencia os laboratórios de ensaios, atestando que eles tenham os equipamentos e procedimentos operacionais adequados, para o controle do concreto estrutural. Também, a qualificação da mão de obra laboratorial deveria complementar o credenciamento e estar em conformidade com a NBR 15146:2012. Essa qualificação visa garantir que os laboratoristas dominem os procedimentos de ensaios normalizados, sendo o IBRACON o órgão certificador dessa mão de obra qualificada.

Conforme assinala Carromeu et al. (2012) no país, em fevereiro 2012, os laboratórios credenciados que atuavam no Controle de Aceitação do concreto eram 20, e desses, 14 tinham atribuição para amostrar, conforme NBR NM 33:1998, verificar a consistência, segundo a NBR NM 67:1998, moldar, segundo a NBR 5738:2015 em obra (instalações do cliente) e

romper em laboratório (instalações permanentes). Com relação à mão de obra certificada na mesma data, no site do IBRACON registraram 235 profissionais certificados nos níveis e funções estabelecidos pela entidade, todos na especialidade de controle tecnológico do concreto.

Até a presente data a situação não mudou muito, segundo a consulta feita no site do INMETRO no catálogo da Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio (RBLE). Na data 04/07/2017, constata-se que existem apenas 51 laboratórios credenciados, tendo 16 estados que ainda não tem laboratórios credenciados, segundo Figura 2.7. Com relação à mão de obra, a página eletrônica do IBRACON registra 235 profissionais portadores de certificações.

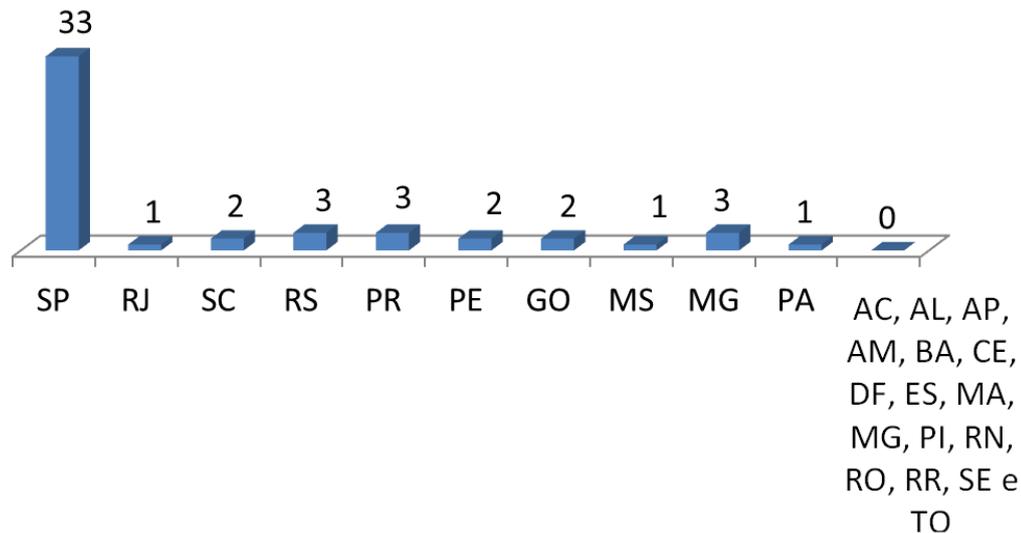


Figura 2.7 – Laboratórios credenciados por estados (INMETRO, 2017)

Toda a situação assinalada, nos canteiros de obra e quando o controle não seja rigoroso com relação aos cuidados da escolha da empresa para os serviços laboratoriais pode levar a que a resistência real do concreto aplicado pode-se distanciar dos resultados obtidos através de corpos de prova ensaiados em condições normalizadas. Nessas condições é comum a geração de resultados inconsistentes, que conduzem a desgastes desnecessários entre as partes envolvidas e obras sem controle ou com controle precário, sujeitas a interpretações, com base em falsas premissas.

2.2.3 Resistência do Concreto

De acordo à NBR 6118:2014 o valor característico “ f_{ck} ” da resistência é o que, num lote do material, tem uma determinada probabilidade de ser ultrapassado, no sentido desfavorável

para a segurança. No caso da norma, a resistência característica à compressão simples do concreto ou “ f_{ck} ” é o valor que tem 95 % de ser atingido pelos elementos num lote. Esse valor é o adotado pelo projetista estrutural. O FIB Model Code 2010 da Europa e a Norma Espanhola EHE-08 apresentam definições similares com a Normativa Brasileira, em tanto o ACI 318-14a denomina a esse valor como resistência de projeto.

Supondo a existência de uma grande amostra de CPs similares, que represente todo o concreto da estrutura, os resultados dos ensaios mostrarão uma distribuição ou dispersão em relação à resistência média, em uma distribuição característica denominada distribuição gaussiana ou normal (ACI, 2014; FUSCO, 2013; WOGGIN, 1974). Um exemplo dessa curva de distribuição de frequência normal está ilustrado na Figura 2.8.

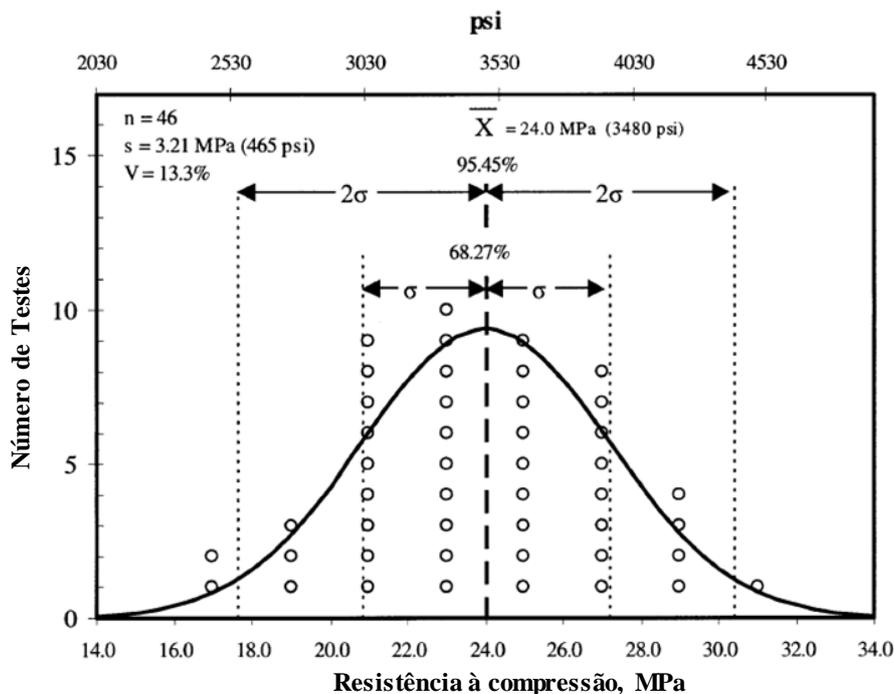


Figura 2.8 – Distribuição de dados da resistência à compressão do concreto e distribuição normal correspondente (baseado em ACI, 2014)

2.2.4 Variação da Resistência do Concreto

De acordo ao ACI 214R-14b, inevitavelmente, resultados de resistência de teste podem variar. A variação da resistência pode ter diversas causas: lote a lote, as variações nas proporções e características dos materiais constituintes do concreto, a produção, a entrega e processo de manipulação, as condições climáticas, a mais de variações na amostragem, na preparação de amostras, a cura, e os procedimentos de ensaios.

Conclusões sobre a resistência de concreto só pode ser derivada a partir de uma série de testes. As características de resistência do concreto podem ser estimadas com razoável precisão apenas quando uns números adequados de testes são realizados, em estrita conformidade com as práticas standard e métodos de ensaio.

Em princípio os CPs devem ser moldados aos pares, escolhendo-se um único exemplar, correspondente ao maior dos dois valores obtidos. Essa regra decorre da óbvia forte autocorrelação que existe entre as resistências de CPs gêmeos, moldados no mesmo ato. Em princípio os CPs deveriam dar o mesmo resultado, se a manipulação dos mesmos durante a moldagem, durante a cura e durante os ensaios não tivesse uma variabilidade própria, que não deveria influir no resultado a ser obtido (FUSCO, 2013).

Por outra parte, os ensaios por si só introduzem erros. É importante ter consciência disso e compreender o que se entende por precisão dos ensaios de concreto. A precisão mostra o grau de concordância entre resultados de ensaios independentes, obtidos sob condições estipuladas, em termos de repetitividade e reprodutibilidade (NEVILLE, 2013).

A BS ISO 5725-1 (ISO, 1994) define **repetibilidade (r)** como a precisão de resultados de ensaios independentes, realizados em um determinado período de tempo nas mesmas condições, ou seja, no mesmo laboratório, o mesmo método, CPs idênticos, o mesmo operador e utilizando o mesmo equipamento. A mesma também define a **reprodutibilidade (R)** dos ensaios como a precisão de resultados obtidos com o mesmo método, CPs idênticos em laboratórios diferentes com operadores e equipamentos diferentes. Segundo a BS 5497-1:1993, “r” e “R” são dados pelas Equação 2.1, Equação 2.2 e Equação 2.3.

$$r = 1,96 \cdot (\sigma_r^2)^{1/2} = 1,96\sigma_r \quad (2.1)$$

$$R = 1,96 \cdot [2 \cdot (\sigma_L^2 + \sigma_R^2)]^{1/2} \quad (2.2)$$

$$R = 1,96 \cdot (2\sigma_r^2)^{1/2} = 2,8\sigma_r \quad (2.3)$$

Onde:

- a) “r” é a repetibilidade;
- b) “R” é a reprodutibilidade;
- c) “ σ_r^2 ” é a variância da repetibilidade;
- d) “ σ_L^2 ” é a variância entre laboratórios (incluindo variâncias entre operadores e entre equipamentos);
- e) “ σ_R^2 ” é a variância da reprodutibilidade.

NEVILLE (2013) aponta, para cilindros de 160 mm x 320 mm, valores de “r” e “R”, respectivamente, de 8 % e 11,7 %. De acordo com o ACI 214R-14, os principais fatores causadores de variações na resistência do concreto são os da Tabela 2.4.

2.2.5 Classificação da Resistência do Concreto

De maneira geral, as normas classificam o concreto em função da resistência à compressão e da densidade seca, segundo faixas de valores para cada caso. Pelo FIB MODEL CODE 2010, as Tabela 2.5 e Tabela 2.6 mostram essa classificação, em que a resistência à compressão é definida pela ruptura dos corpos de provas cilíndricos de 150/300 mm. Já a NBR 8953:2015 faz a classificação em dois grupos, como é mostrado na Tabela 2.7, sendo permitida a especificação de valores intermediários de resistência.

Tabela 2.4 – Principais fatores que podem causar variações na resistência do concreto entre lotes e dentro de cada lote (baseado em: ACI 2014R-14)

Variações entre lotes	Variações dentro do lote
Variações nas características e proporções da dosagem do concreto:	Amostragem inadequada da amostra do lote:
agregados; cimento e adições; aditivos.	formas danificadas; adensamento fora do padrão; manuseio incorreto de amostras.
Varição na <i>a/c</i> por:	Diferenças na cura:
Inadequado controle da quantidade de água; Variação da umidade na armazenagem dos agregados.	atrasos no início da cura inicial; variações de temperatura; controle de umidade variável; cura inicial fora do padrão; atrasos na entrega de cilindros de teste; manuseio descuidado de cilindros no transporte; cura final inadequada.
Variações na mistura, transporte e amostragem:	Variações da amostra de teste:
tempo de mistura e velocidade; distância entre a central fixa do concreto e o canteiro da obra; condições da estrada; amostragem não representativa do lote.	técnico não certificado; preparação ineficaz da superfície do corpo de prova; equipamentos de testes inadequados ou não calibrados; velocidade de aplicação de carga fora do padrão; mau registro de dados.
Variações na colocação e adensamento:	
caminhão betoneira ou bomba; vibração interna ou externa; operários diferentes no mesmo procedimento da moldagem.	
Variações da temperatura e da cura do concreto*:	
estações do ano (verão ou inverno); umidade ambiente; velocidade do vento.	
*Aplica-se a resistência <i>in loco</i> da estrutura.	

Tabela 2.5 – Classificação e classes de resistência de concretos normais

Tipo de concreto	Classe de resistência ($f_{ck}/f_{ck, cubo}$)						
	C8/10	C12/15	C12/20	-	-	-	-
concreto de baixa resistência	C8/10	C12/15	C12/20	-	-	-	-
concreto de resistência normal	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
concreto de alta resistência	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105	C100/115	-
concreto de ultra alta resistência ⁽¹⁾	C110/130, C120/140						

⁽¹⁾ Não incluído na UNE-EN 206-1:2001 (AENOR, 2001)

(fonte: FIB MODEL CODE 2010)

Tabela 2.6 – Classificação e classes de massa específica de concretos

Tipo de concreto	Classe de massa específica (kg/m ³)
concreto leve	800 - 2.000
concreto com peso normal	2.000 – 2.600
concreto pesado	> 2.600

(fonte: FIB MODEL CODE 2010)

Tabela 2.7 – Classes de resistência de concretos estruturais

Classes de resistência			
Grupo I	Resistência característica à compressão (MPa)	Grupo II	Resistência característica à compressão (MPa)
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

(fonte: NBR 8953:2015)

A resistência à compressão é definida pela ruptura dos corpos de prova cilíndricos de 100/200 mm ou 150/300 mm, conforme a antepenúltima tabela. Já a classificação do concreto em relação ao valor da massa específica é definida de acordo com a NBR 8953:2015 como segue:

- a) concreto normal (C): concreto com massa específica seca compreendida entre 2.000 kg/m³ e 2.800 kg/m³;
- b) concreto leve (CL): concreto com massa específica seca inferior a 2.000 kg/m³;
- c) concreto pesado ou denso (CD): concreto com massa específica seca superior a 2.800 kg/m³.

A norma que faz mais diferenças é a EHE-08 da Espanha, onde a tipificação do concreto é T-R/C/TM/A, onde:

- a) “T” é indicativo do tipo de concreto, que pode ser:
 - “HM”, no caso do concreto massa;
 - “HA”, no caso do concreto armado;

- “HP”, no caso do protendido;
- b) “R” é a resistência característica, em “N/mm²”;
- c) “C” é a letra inicial da consistência do concreto;
- d) “TM” é o tamanho máximo do agregado graúdo, em “mm”;
- e) “A” é a designação do ambiente onde estará exposta a estrutura.

A classificação da resistência característica, especificada “ f_{ck} ”, em N/mm² para um concreto de 2.500 kg/m³ de massa específica seca, tem as denominações C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50, C55, C60, C70, C80, C90 e C100.

A resistência é obtida mediante corpos de prova cilíndricos de 150/300 mm.

2.2.6 Valor Mínimo da Resistência do Concreto

Todas as normas fazem diferenças neste ponto. A EHE-08 aceita a resistência 20 MPa somente para concreto massa, exigindo um mínimo de 25 MPa para concreto armado, na mesma direção o FIB Model Code 2010 (FIB, 2010) especifica um concreto classe C25 para o desenho de estruturas do concreto armado. Em quanto que a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) aceita concreto de classe C20, como valor válido para concreto armado, exigindo concretos com resistência mínima de 25 MPa para concretos com armaduras ativas.

É importante destacar que com o aumento da resistência especificada do concreto de 20 MPa a 25 MPa, o ganho de durabilidade é muito importante, já que depende principalmente da relação a/c e do tipo do cimento, portanto, da porosidade do concreto obtida, o que influi na diminuição e no aumento da durabilidade. Na Figura 2.9, Lian et al. (2011) apresentam essa relação entre a resistência à compressão e a porosidade, na qual se observa que, quando se varia a resistência de 20 MPa a 25 MPa, a porosidade apresenta uma variação aproximada de 5 %. Mais quando a resistência varia de 35 MPa para 40 MPa a porosidade em 2% aproximadamente. O seja, o aumento da porosidade é maior nos concretos de resistência mais baixa.

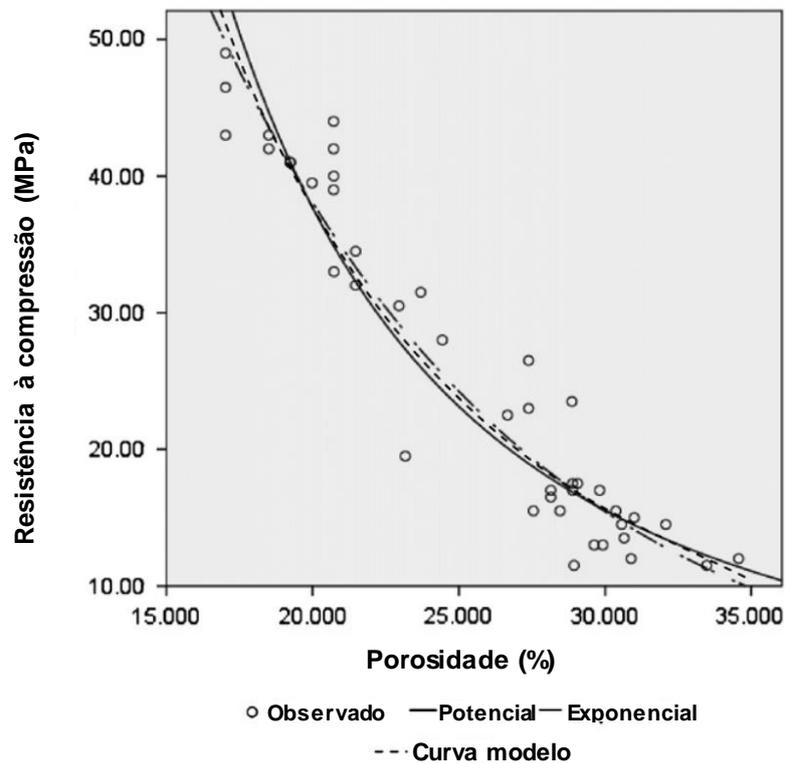


Figura 2.9 – Relação entre a resistência à compressão e porosidade do concreto (baseado em LIAN et al., 2011)

2.2.7 Adensamento dos corpos de prova

O processo para o adensamento do concreto na moldagem dos corpos de prova pode ser mecânico ou manual. A NBR 5738:2015 e a ASTM C31/C31 M-12 têm definidos procedimentos praticamente idênticos e em função do diâmetro. No caso dos corpos de prova cilíndricos, fazem as seguintes classificações, respectivamente, contidas nas Tabela 2.8 e Tabela 2.9, sendo esta baseada nas tabelas 3 e 4 da ASTM C31/C31 M-12.

Tabela 2.8 – Requisitos do processo para o adensamento do concreto na moldagem dos corpos de prova, segundo a NBR 5738:2015

Tipo de corpo de prova	Dimensão básica “d” (mm)	Número de camadas em função do tipo de adensamento		Número de golpes para adensamento manual
		Mecânico	Manual	
cilíndros	100	1	2	12
cilíndros	150	2	3	25

Tabela 2.9 – Requisitos do processo para o adensamento do concreto na moldagem dos corpos de prova, segundo a ASTM C31/C31 M-12

Tipo de corpo de prova	Dimensão básica “d” (mm)	Número de camadas em função do tipo de adensamento		Número de golpes para adensamento manual
		Mecânico	Manual	
cilindros	100	2	2	25
cilindros	150	2	3	25

As únicas diferenças entre essas duas normas são os números de camadas para o tipo de adensamento mecânico e de golpes para adensamento manual no caso de corpos de prova com diâmetro de 100 mm. Enquanto a CSN EN 12390-2, tem a mesma indicação para o adensamento manual de CPs de 150 mm, mas para o adensamento mecânico não estabelece um número de camadas, especificando somente que ele tem que ser aplicado durante um tempo mínimo necessário para obter um adensamento completo do concreto, reconhecido pela ausência da nata de cimento e segregação na superfície do corpo de prova.

É importante o destaque do trabalho de Ortega (2010), onde conclui que no caso de que a compactação do corpo de prova é feita com vibrador mecânico, o valor de penetração da água a pressão cai à metade do valor obtido no caso da compactação manual. A mais da melhora relacionada com a durabilidade, também a vibração mecânica melhora as características físicas do concreto, desde que é produzida uma distribuição mais fechada e uniforme dos componentes, obtendo-se menor porosidade e como consequência um melhor concreto. Seus resultados mostram um aumento de 8 % da resistência à compressão deste método com relação à compactação manual, em corpos de prova mantidas a 36 °C e 20 % de umidade relativa.

2.2.8 Cura inicial dos corpos de prova

O controle da aprovação de um concreto, tem como mínimo a verificação do abatimento e da resistência (usualmente à compressão). Para a determinação da resistência é necessário a moldagem no próprio canteiro, mas o corpo de prova depois da moldagem não pode ser movimentado, conforme a NBR 5738:2015. É por isso que as condições ambientais (temperatura e vento) e deficiências na proteção dos corpos de prova na obra, podem alterar os resultados da resistência à compressão, com maior ou menor intensidade.

Uma investigação feita na Espanha por Calavera et al. (2005) sobre a influência da cura inicial no canteiro de obra na resistência à compressão em concretos de 25 e 40 MPa, em que

a temperatura inicial ficava em uma faixa de 25 °C a 35 °C, mostrou que os melhores resultados são obtidos no caso em que os corpos de prova, depois da moldagem, ficam em uma sacola com juta, mostrando valores muito próximos aos obtidos fazendo a cura imediata na câmara úmida estandar.

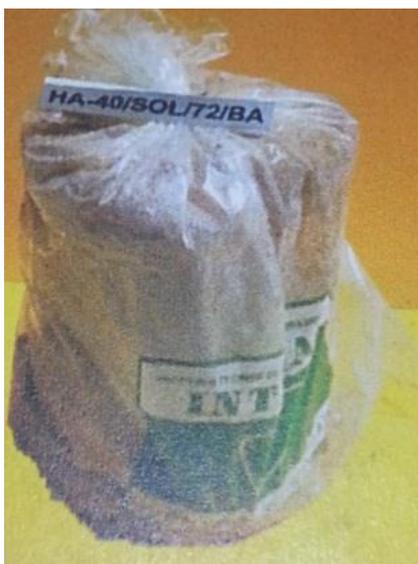


Figura 2.10 – Corpo de prova depois da moldagem em uma sacola com juta (CALAVERA et al., 2005)

A Tabela 2.10 apresenta uma análise dos requisitos para a cura inicial dos corpos de prova (cps).

Fazer cumprir os requisitos é uma realidade muito distante do que normalmente acontece em nossos canteiros de obra; dispor de um recinto específico para a armazenagem dos cps nas primeiras horas é difícil pelo próprio desenvolvimento do trabalho.

Tabela 2.10 – Comparações entre os requisitos e comentários das NBR 5738:2015, CSN EN 12390-2 e ASTM C31/C31 M-12

Norma	Tempo mínimo dentro do molde (h)	Prazo máximo de desmoldagem (h)	Temperatura no local (°C)	Local para cura inicial	Recomendações e comentários
NBR 5738:2015 (ABNT, 2015a)	24	não especificado	não especificada	sempre que possível, os CPs devem ser moldados no local onde devem ser armazenados protegidos de intempéries	fazer cobertura das corpos de prova com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água do concreto
CSN EN 12390-2 (CSN, 2009)	16	72	20 ± 5 ou, para tempo quente, 25 ± 5	protegido dos impactos e vibrações	manter umidade ≥ 95 % e fazer inspeções frequentes para garantir que as superfícies das corpos de prova fiquem sempre úmidas
ASTM C31/C31 M-12 (ASTM, 2012)	não especificado	48	16 a 27 ou, para concretos com resistência ≥ 40 MPa, 20 a 26	sempre que possível, os CPs devem ser moldados próximos ao local onde devem ser armazenados protegidos da ação direta do sol	Pode dispor-se de equipamentos para manter umidade, e os resultados de resistência às primeiras idades podem ser baixos quando a temperatura do local de armazenagem está compreendida entre 16 °C e 27 °C

Em uma investigação sob o mesmo tema, Ortega (2010) faz uma análise estatística com mais de 10.000 corpos de prova, onde um grupo delas, às primeiras horas, ficavam na intempérie no interior de uma sacola plástica, com uma faixa de 4 °C a 15 °C de temperatura ambiente e outro grupo com uma faixa de 15 °C a 35 °C. A resistência média à compressão no primeiro grupo é maior do que o segundo, portanto conclui-se que se a temperatura ambiente fica entre 5 °C e 15 °C poderá não ser preciso manter a temperatura inicial do corpo de prova na faixa de 15 °C a 35 °C de acordo aos requisitos da EHE-08.

Para um concreto tipo HA-25/B/20/II estabelece as seguintes conclusões:

- a) nas primeiras 24 h, com temperatura de cura de 36 °C e 20 % de umidade relativa, o concreto tem uma diminuição da resistência à compressão aos 28 dias entre 8 % e 10 %;
- b) quando a temperatura de conservação dos corpos de prova é maior, também é maior a permeabilidade de acordo com o ensaio de penetração de água à pressão (CSN, 2009).

A explicação dessas conclusões é que, quando a temperatura é alta nas primeiras horas da cura, a velocidade que acontecem as reações químicas da hidratação do cimento aumenta e contribui ao crescimento das resistências iniciais do concreto com a formação de maior porosidade capilar, resultando na maior permeabilidade; por outra parte os poros não ficam cheios dos geles produzidos durante a hidratação do cimento e a pasta hidratada fica debilitada como mostram as Figura 2.11, Figura 2.12 e Figura 2.13 mediante microscópio eletrônico de varredura.

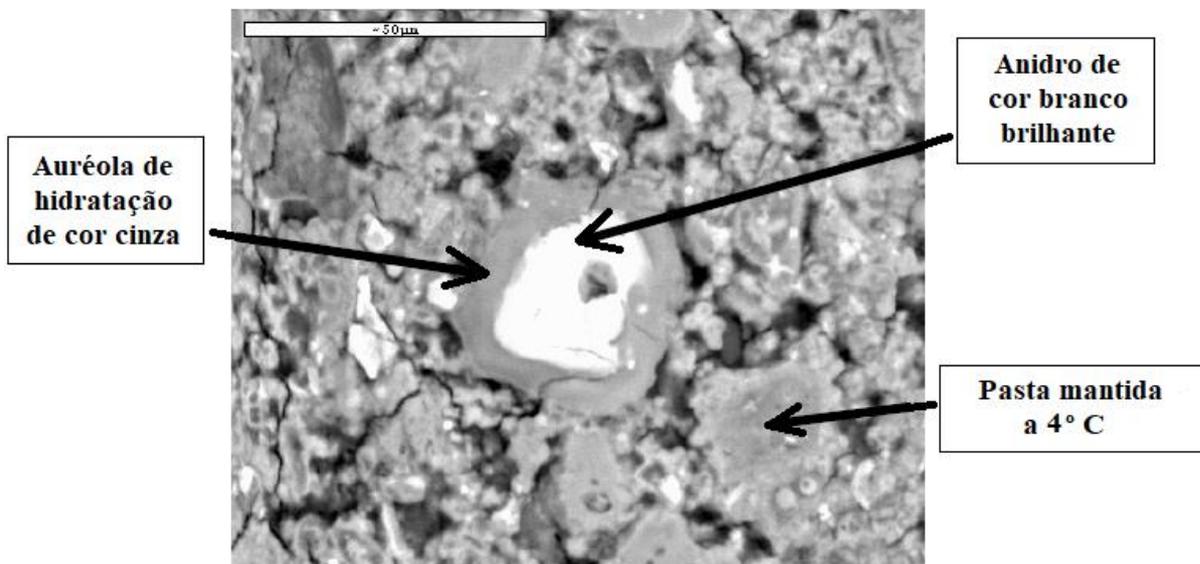


Figura 2.11 – Silicato anidro rodeado por um halo de hidratação em uma pasta mantida a temperatura de 4 °C (x 1.000 aumentos) (ORTEGA, 2010)

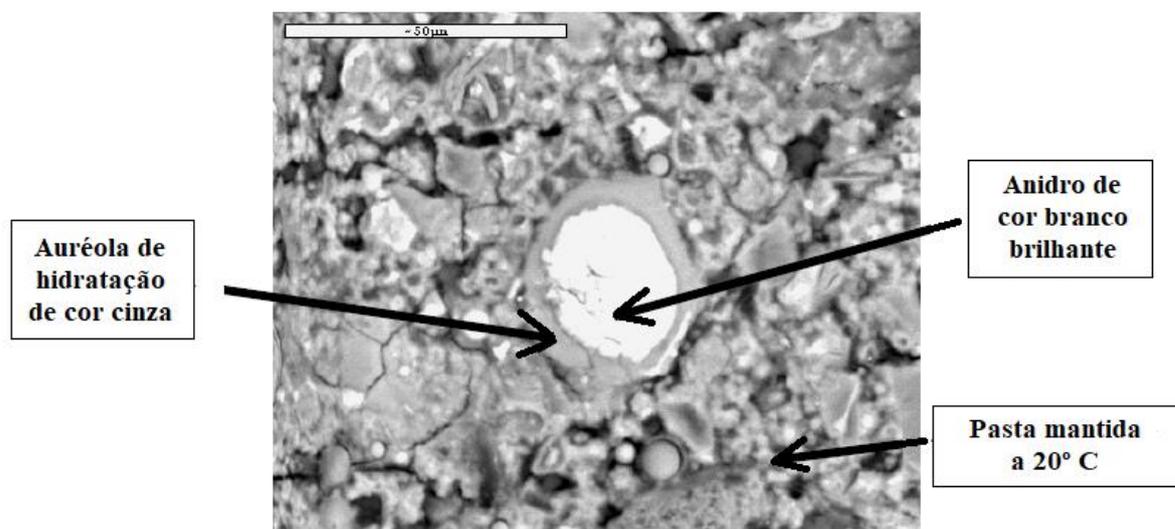


Figura 2.12 – Silicato anidro rodeado por um halo de hidratação em uma pasta mantida a temperatura de 20 °C (x 1.000 aumentos) (ORTEGA, 2010)

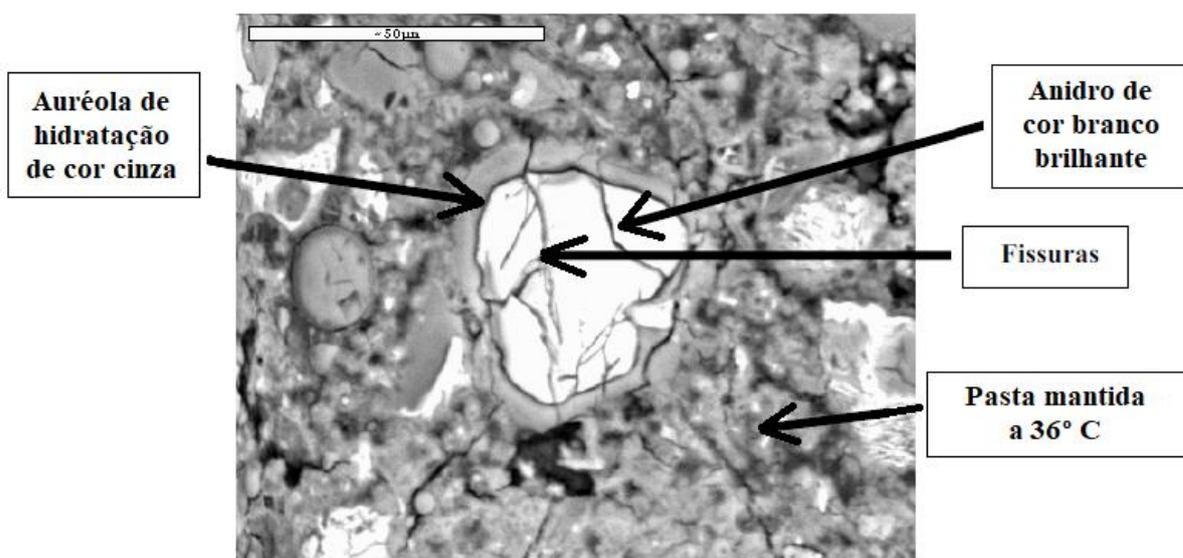


Figura 2.13 – Silicato anidro rodeado por um halo de hidratação em uma pasta mantida a temperatura de 36 °C (x 1.000 aumentos) (ORTEGA, 2010)

2.2.9 Cura Não Normalizada dos CPs

Mesmo que as diversas normas tenham estabelecido o processo de cura dos corpos de prova, muitas vezes na própria obra surgem discussões sobre a utilidade ou não de deixar os CPs na mesma condição da estrutura e, o que pior, fazer o julgamento da qualidade do concreto com eles.

Ao fazer a comparação entre uma estrutura e um corpo de prova na câmara úmida, vemos que as condições de temperatura e umidade são diferentes, a mais das diferenças de tamanho, geometria e do tipo das fôrmas das estruturas, por tanto não tem fundamentação técnica procurar definir o cumprimento da resistência à compressão do concreto de essa maneira.

Os corpos de prova, moldados com o mesmo procedimento para controle da resistência, mas com o processo de cura igual à estrutura são admitidos pelas NBR 5738:2015 (ABNT, 2015a), EHE-08 (CPH, 2008) e ACI 214R-14 (ACI, 2014b). Os objetivos são, entre outros:

- a) conhecer o desenvolvimento da resistência nas primeiras idades;
- b) verificar as condições de proteção e cura do concreto;
- c) fazer o retiro das fôrmas da estrutura;
- d) aplicação das cargas na estrutura;
- e) fazer as operações de protensão da estrutura.

2.2.10 Influência do Capeamento de corpos de prova cilíndricos

É indiscutível a importância do ensaio de resistência à compressão como base para o cumprimento da qualidade de uma estrutura de concreto armado. Dentro dos diversos parâmetros que influenciam os resultados deste ensaio destacam-se os mecanismos de preparação dos topos dos corpos de prova, visto que eles normalmente apresentam irregularidades que devem ser corrigidas com o objetivo de torná-los planos e lisos.

Um trabalho feito sob o tema Jerônimo et al. (2011) avaliou em um grupo de corpos de prova a influência da regularização das faces dos corpos-de-prova usando neoprene, argamassa de enxofre e retificação mecânica nos resultados da resistência à compressão. A conclusão mostrou que a utilização de neoprene teve o melhor resultado, posto que sendo flexível permite uma acomodação mais adequada das imperfeições e tem dureza compatível com a do concreto. A Figura 2.14 mostra os resultados.

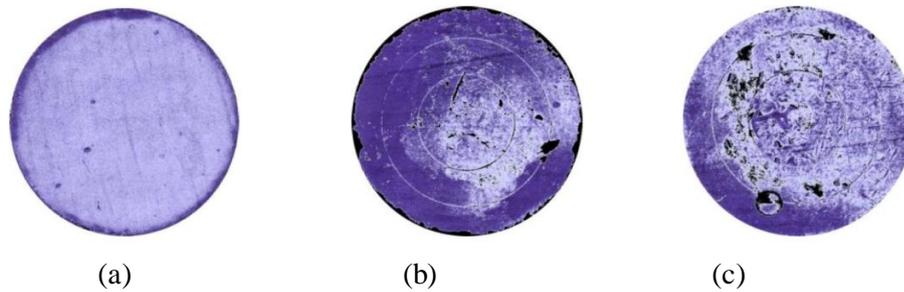


Figura 2.14 – Imagens escaneadas correspondentes aos topos dos corpos de prova: (a) regularização com neoprene, (b) retificado e (c) capeamento com enxofre (JERÔNIMO et al., 2011)

A Figura 2.14 representa as imagens escaneadas correspondentes, respectivamente, aos topos com neoprene confindo, retificados e capeamento com enxofre. As áreas pretas correspondem à falta de contato com a prensa. Quando somadas as áreas sem contato, os resultados encontrados nos topos regularizados com enxofre e com retificadora mostraram resultados semelhantes.

A utilização de neoprene é de fácil manuseio e ainda contribui para a eliminação de riscos à saúde dos operadores e laboratoristas. Embora existam cuidados imprescindíveis para a adoção do neoprene; principalmente no aspecto do tempo de vida útil do material e resistência do concreto que será ensaiado. A Tabela 2.11 a continuação tomada da ASTM C1231/C1231 M-15 mostra os requerimentos que devem cumprir o neoprene.

Tabela 2.11 – Requisitos para o uso de pads de policloropreno (neoprene)

Resistência à compressão de cilindros, (MPa)	Durometro Shore A de dureza	Teste de qualificação exigido	Reutilizações Máximas (*)
10 to 40	50	Nenhum	100
17 to 50	60	Nenhum	100
28 to 50	70	Nenhum	100
50 to 80	70	Solicitado	50
Maior do que 80		Não Permitido	

(*) Número máximo de reutilizações. Ele vai ser menor se as pastilhas estão rachadas ou quebradas.

(fonte: ASTM C1231/C1231 M-15)

A NBR 5738:2015 diz que a preparação das bases dos corpos de prova cilíndricos para ensaio pode ser feita por retificação ou capeamento, não especificando o uso de neoprene, embora assinala que outros processos podem ser adotados, desde que estes sejam submetidos à

avaliação prévia por comparação estatística, com resultados obtidos de corpos de prova capeados por processo tradicional e os resultados obtidos apresentarem-se compatíveis.

2.2.11 Controle Tecnológico Aplicado aos corpos de prova

Rememorando que o controle tecnológico do concreto é muito mais abrangente que somente a rotura de corpos de prova. Nas Figuras 2.15 e 2.16, são apresentadas diversas condições de corpos de prova, obtidas em canteiros de obras, onde se observam como elas estavam afastadas das diversas especificações para a moldagem, acabamento e transporte até o laboratório.



Figura 2.15 – Corpos de prova com: a) superfície plana e irregular, b) adensamento inadequado, c) e d) acabamento inadequado do topo



Figura 2.16 – Corpos de prova com manipulação deficiente para transporte ao laboratório de ensaio

2.3 FERRAMENTAS DE CONTROLE DA RESISTÊNCIA NAS PRIMEIRAS IDADES

Segundo o que foi colocado anteriormente, o concreto, nas primeiras idades, tem diversos fatores que influenciam o desenvolvimento da resistência. Em condições de laboratório a influência dos fatores pode, de alguma forma, ser mais ou menos controlada enquanto que, no caso do canteiro de obra, o controle dos fatores é praticamente impossível. O método da maturidade é uma das ferramentas para esse objetivo, mesmo como os ensaios não destrutivos (END) e por fim o ensaio APULOT que é apresentado como uma nova alternativa de ensaio. Expõem-se a seguir, as diversas alternativas de controle.

2.3.1 Método da Maturidade do Concreto

O método da maturidade é um ensaio não destrutivo utilizado para avaliação das propriedades do concreto que estejam relacionadas ao desenvolvimento do grau de hidratação do material, a partir do seu histórico de temperaturas.

Segundo o ACI 308R-16 o método da maturidade foi desenvolvido como uma ferramenta para estimar o efeito acumulado do tempo e da temperatura no período da cura nas propriedades do concreto. Ele se fundamenta na influencia da temperatura sob a rapidez da reação entre o cimento e a água, e supõe que enquanto mais alta a temperatura do concreto, mais rapidamente é a hidratação do cimento e, portanto, mais rápido o desenvolvimento das propriedades relacionadas do concreto.

Sobre a utilização do método da maturidade o ACI 308R-16, indica que é necessário garantir que a mistura utilizada na estrutura é a mesma que aquela que foi utilizada no laboratório, no processo do estabelecimento da correlação entre a maturidade e a resistência à compressão.

De acordo com o ACI 306R-16, a primeira equação utilizada para fazer a determinação da Maturidade (Saul 1951) é a Equação 2.4.

$$M(t_n) = \sum_{i=1}^n (T_i - T_o) * \Delta t_i \quad (2.4)$$

Onde:

- a) “ $M(t_n)$ ” é o fator de maturidade na idade “ t_n ”, em “°C.h”;
- b) “ T_i ” é a média da temperatura em um intervalo de tempo “ Δt_i ”, em “°C”;
- c) “ T_o ” é a temperatura de base, em “°C”;
- d) “ Δt_i ” é o intervalo de tempo, em “h”.

Indicando que o valor da temperatura “ T_o ” depende do tipo de cimento, o tipo e quantidade de aditivos e a faixa da temperatura da cura.

A maturidade ou índice de maturidade a uma idade “ t_n ”, calculado pela equação acima, equivale à área compreendida entre a curva de temperatura e a temperatura de base, como ilustrado pela Figura 2.17.

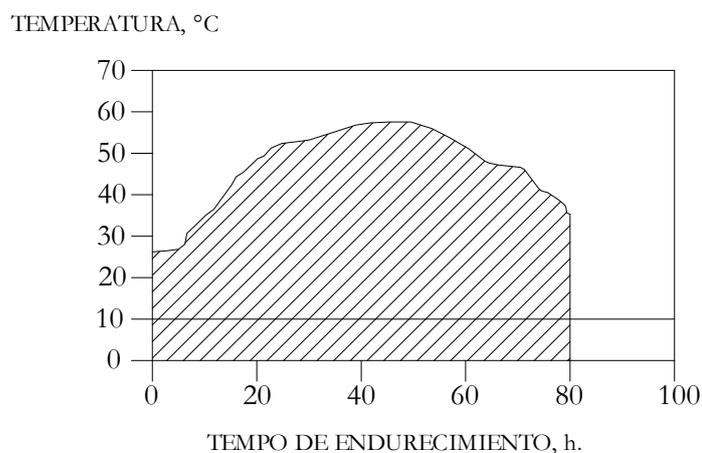


Figura 2.17 – Desenvolvimento da temperatura ao longo do tempo (baseado em: CANOVAS, 2013)

Segundo Canovas (2013), para poder afirmar que a uma maturidade determinada sempre corresponde um valor da resistência, têm-se que cumprir determinadas condições, a primeira é que os concretos sejam iguais, portanto a dosagem e os tipos de materiais têm que ser idênticos. A segunda que no cálculo da resistência baseado no índice de maturidade, as temperaturas não superem os 40 °C, já que nessa situação o valor da maturidade do cálculo é inferior ao valor na realidade.

Uma mesma mistura de concreto a um mesmo grau de maturidade (medido como função de temperatura e tempo) tem aproximadamente a mesma resistência, qualquer que seja a combinação de temperatura e tempo para atingir o grau de maturidade.

Como exemplo ilustrativo, uma mistura de concreto que apresente fator $a/c = 0,3$ fornecerá diversas curvas para o desenvolvimento de sua resistência à compressão em função do tempo para cada temperatura do material conforme ilustrado pela Figura 2.18.

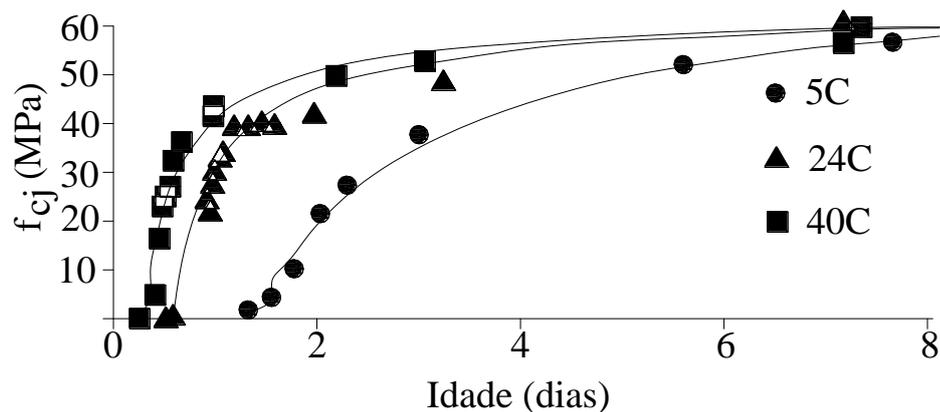


Figura 2.18 – Influência da temperatura no desenvolvimento da resistência à compressão para uma mistura de concreto com fator $a/c = 0,3$ (baseado em: PINTO, 2000 apud PERES, 2006)

2.3.1.1 Idade fictícia e energia de ativação

Chama-se de idade fictícia do concreto, a uma correlação matemática expressada em horas ou dias, que visa ajustar as propriedades reológicas do concreto para os casos em que seu endurecimento ocorre a temperaturas diferentes de 20 °C, baseado no conceito da igualdade da maturidade.

Segundo Sofi et al. (2011), apresenta a Equação 2.5, assinalando que é a mais precisa, levando em conta a variação da temperatura e sua afetação no desenvolvimento da resistência.

$$t_e = \sum_0^t e^{-(E_a/R)*[(1/T)-(1/T_r)]} * \Delta t \quad (2.5)$$

Onde:

- a) “ t_e ” é a idade equivalente à temperatura de referência, em “dias”;
- b) “ E_a ” é a energia de ativação aparente, em “ Jmol^{-1} ”;
- c) “ R ” é a constante de gás universal, em “ $\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ”;
- d) “ T ” é a temperatura do concreto no intervalo de tempo “ Δt ”, em “ K ”;
- e) “ T_r ” é a temperatura de referência, em “ K ”;
- f) “ Δt ” é o intervalo de tempo, em “ K ”.

Uma vez que a idade equivalente for encontrada, as funções de maturidade de resistência podem ser usadas para uma idade particular.

Algumas das funções de resistência-maturidade, obtidas para a condição da cura isotérmica, são apresentados no quadro da Tabela 2.12.

Tabela 2.12 – Funções e parâmetros de resistência-maturidade (baseado em: SOFI et al., 2011)

Nome da Função	Função resistência-maturidade	Parâmetros
Linear hiperbólica	$S = S_\infty \frac{k_T(t_e - t_o)}{1 + k_T(t_e - t_o)}$	S = resistência a idade t_e , onde t_e é a idade equivalente ^(*) ; S_∞ = Resistência limite; k_T = constante de velocidade, 1/dia; t_o = idade em que começa a desarrolar resistência.
Parabólica hiperbólica	$S = S_\infty \frac{\sqrt{k_T(t_e - t_o)}}{1 + \sqrt{k_T(t_e - t_o)}}$	Como foi mencionado acima
Exponencial	$S = S_\infty e^{-\left(\frac{\tau}{t_e}\right)^\alpha}$	t_e = idade equivalente; τ = uma constante de tempo (o valor $1/\tau$ constante de velocidade k_T = para esta função); α = parâmetro de forma
Plowman	$S = a + b \log(M)$	a = resistência ao índice de maturação $M=1$; b = declive da recta; M = índice de maturação.

^(*) t_e idade equivalente é definida na equação

$$t_e = \sum_0^t e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)} \Delta t$$

Barbosa et al. (2008) avaliaram os valores de Energia Aparente de Ativação (E_a) para os cimentos fabricados no Brasil, assim como a variação desse parâmetro com a adição de sílica ativa, nas proporções de 8 e 16 % sobre a massa de cimento, conforme dispostos na Tabela 2.13.

Tabela 2.13 – Valores de “E_a” para cimentos brasileiros

c	Energia Aparente de Ativação (kJ/mol)		
	0 % de sílica	8 % de sílica	16 % de sílica
CP-I-S	35,4	-	-
CP-II-F-32	31,4	32,1	34,8
CP-II-Z-32	31,3	32,5	35,7
CP-III-S	20,4	27,1	40,2
CP-IV-S	50,4	52,9	56,1
CP-V-ARI	43,9	39,6	42,4

(fonte: BARBOSA et al., 2008)

Os valores de Energia Aparente de Ativação são característicos de cada tipo de concreto e estão relacionados com as suas composições e respectivas adições químicas e minerais.

A ASTM C1074-11 faz a definição do roteiro para a determinação da resistência à compressão com a utilização do método da maturidade, trabalho feito no laboratório com a dosagem do concreto a ser utilizado no canteiro da obra. Dentro dos trabalhos se encontra a determinação da Energia Aparente de Ativação.

Com relação à função da idade fictícia, de acordo com Canovas (2013), na atualidade, a importante quantidade de tipos de cimentos e a sua variabilidade pelo tipo de adições e o uso de aditivos especialmente os superplastificantes, fazem que a utilização das funções da idade fictícia não apresente resultados fidedignos, especialmente no caso do uso de aditivos baseados em policarboxilatos.

2.3.1.2 Aplicação nos canteiros de obra

No método da maturidade a informação da resistência é obtida no tempo real, desde que as medições da maturidade na própria estrutura, são coletadas pelos *softwares* dos equipamentos comerciais disponíveis. Com essa informação pode-se aumentar a velocidade da construção.

Sofi et al. (2011) em uma pesquisa feita em diversos canteiros de obra, onde foi aplicado o método da maturidade, conclui que as funções de maturidade têm mostrado que são ferramentas para fornecer uma estimativa confiável do desenvolvimento da resistência do concreto as primeiras idades. Além disso, a sensibilidade desse estudo concluiu que as previsões de resistência não são significativamente afetadas pelo parâmetro de energia de ativação. Isso poderia simplificar o procedimento de predição das funções da resistência

utilizando maturidade. Assinalando que os resultados da pesquisa são válidos para a média da variação de temperatura “in loco”, em uma faixa de 15 °C e 35 °C.

Em uma investigação feita com o método da maturidade (PERES, 2006) em elementos pré-moldados “in loco”, conclui que regiões com temperatura mais elevadas apresentaram valores maiores de resistência à compressão se comparadas com as regiões menos aquecidas, considerando-se a mesma idade do material durante a cura térmica. Além disso, destaca que temperaturas ambientes elevadas são responsáveis pela ocorrência de ciclos térmicos mais curtos, pois há uma perda menor de calor do sistema para o ambiente. Em dias frios, os ciclos térmicos são mais longos, pois a perda de calor do sistema para o ambiente é maior, ocasionando o aparecimento de temperaturas menores nos elementos estruturais, diminuindo a velocidade das reações do cimento.

2.3.1.3 Limitações do Método da Maturidade

A maturidade pode ter uso prático na estimativa da resistência do concreto. Entretanto, a relação entre resistência e maturidade depende do cimento utilizado, da relação água/cimento e se houve perda de água durante a cura. Além disso, qualquer efeito de uma temperatura elevada precoce é prejudicial e invalida a maturidade. Por essas razões, a maturidade não é largamente utilizada e é útil somente em sistemas de concretagem bem controlados (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Tanto a ASTM C1074-11 e o ACI 306R-16, recomendam que, no caso de se utilizar a maturidade para a tomada da decisão relacionada às operações de segurança da estrutura, como o retiro das fôrmas, protensão ou aplicação de cargas na mesma, seja obrigatório a realização de ensaios complementares como o ensaio de arrancamento.

O ACI 306R-16 assinala que as limitações mais significativas para se fazer este procedimento são:

- a) o concreto dever ser mantido em condições que permitem a hidratação do cimento;
- b) o método não prevê, em longo prazo, os efeitos da temperatura na qual o concreto foi submetido nas primeiras idades;
- c) o método necessita ser acrescido de outras indicações da resistência potencial da mistura de concreto, como a cura acelerada dos corpos de prova.

2.3.2 Ensaios Não Destrutivos para Averiguação da Resistência às Primeiras Idades

De acordo com o enfoque da tese, é apresentada a diversidade de ensaios disponíveis hoje na busca de averiguação da resistência no próprio canteiro de obras entre os três e cinco dias, assinalando as vantagens e limitações deles.

Segundo Schabowicz (2010), os ensaios não destrutivos para a determinação da resistência do concreto podem-se classificar em três grupos, de acordo com o seguinte fluxograma apresentado na Figura 2.19.

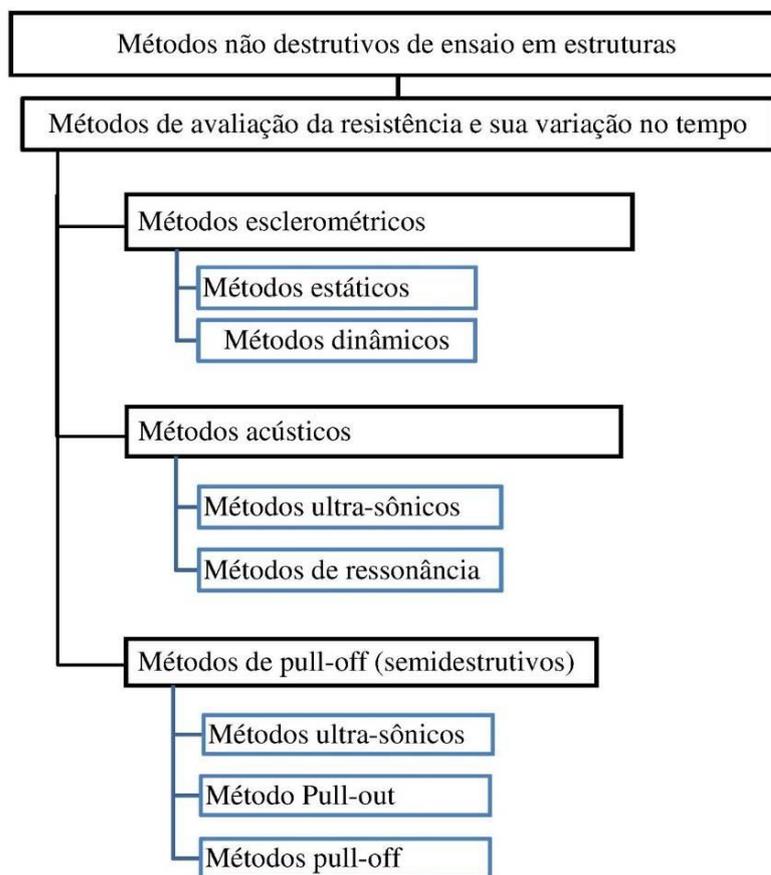


Figura 2.19 – Ensaios não destrutivos para a determinação da resistência do concreto (baseado em: SCHABOWICZ, 2010)

2.3.2.1 Ensaio esclerométrico

Método para a avaliação da dureza superficial do concreto endurecido pelo uso do esclerômetro de reflexão (ABNT, 2012). A inconveniência principal do método é o uso das

curvas que fornece o fabricante do aparelho, e que correlaciona a resistência à compressão em corpos de prova com o índice esclerométrico, já que não correspondem ao concreto em avaliação, posto que o concreto é fabricado com materiais do país do aparelho e as idades do ensaio variam de 14 a 56 dias. Conferindo o indicado, Gavilán (2006) fez uma pesquisa em 9 canteiros de obra comparando a resistência obtida de testemunhos e a resistência obtida da curva do fabricante de aparelho. Ele conclui que considerar a resistência do concreto como a resistência obtida da curva, pode superestimar a resistência em uma faixa de 30 % a 50 %, conforme cresce o tempo para a realização do ensaio. No emprego correto do método devem ser feitas curvas de correlação como o concreto da própria obra.

Finalmente o ACI 228.1R-03 estabelece que no caso do ensaio esclerométrico (ASTM C805/C805M-13a) ele deve ser complementado com outro ensaio, no caso da estimação da resistência do concreto.

2.3.2.2 Métodos de emissão acústica e de ultrassom

De acordo com Malhotra e Carino (2004), os **métodos de emissão acústica** (EA) baseiam-se no registro de ondas elásticas, irradiadas pelos defeitos existentes, causados na estrutura por uma determinada tensão ou fadiga e pode-se utilizar na avaliação de Obras - pontes, viadutos e estruturas de concreto em geral. E, portanto, seu uso não é apropriado na determinação da resistência nas primeiras idades.

O **método de ultrassom** é baseado no conceito de que a velocidade de um pulso de ondas longitudinais através de um material depende de suas propriedades elásticas e densidade. O instrumento consiste em um gerador e um transmissor para a produção e introdução de um pulso de onda no concreto e de um receptor para detectar a chegada do pulso e medir com precisão o tempo de trânsito do pulso pelo concreto. A NBR 8802:2013 (ABNT, 2013) define o procedimento de ensaio.

A Figura 2.20 a seguir mostra um equipamento de ultrassom.



Figura 2.20 – Equipamento de ultrassom

As posições do emissor e receptor podem variar, fazendo a medição direta, indireta ou semi-direta. Das três, conforme Ruiz et al. (2004) e NBR 8802:2013 (ABNT, 2013) a medição direta é mais precisa. A Figura 2.21 mostra os tipos de medições de forma esquemática e real.

<p>medição direta</p>		
<p>medição semi-direta</p>		
<p>medição indireta</p>		

Figura 2.21 – Configurações de medições de velocidade de onda ultrassônica

De acordo ao ACI 228.1R-03, no período inicial do concreto, um aumento determinado na resistência à compressão resulta num grande aumento da velocidade do ultrassom, enquanto o concreto vai aumentando na sua idade, o aumento da velocidade é menor para o mesmo aumento de resistência. Assim, a sensibilidade da velocidade de pulso como um indicador de mudança de resistência do concreto diminui com o aumento da maturidade e a resistência. Os resultados dos ensaios são influenciados pelos diversos fatores relacionados com a composição do concreto, granulometria, tipo e teor de agregados, cura do concreto, e presença da armadura. Breysse (2012) apresenta o grau de influência dos diversos componentes do concreto no ensaio de ultrassom, conforme quadro da Tabela 2.14.

Tabela 2.14 – Fatores influentes nas medições de ultrassom (Baseado em Breysse, 2012)

Traço do concreto	agregado	percentagem ^a tamanho máximo ^b tipo (densidade) ^b
	pasta de cimento	percentagem ^c tipo ^c
	outros	conteúdo de cinzas volantes ^b relação água/cimento ^a
Umidade ^b		
Outros		idade ^b barras de aço ^b vazios, fissuras ^a
^a influência alta, ^b influência média e ^c influência baixa		

Por causa da influência dos diversos fatores, não é possível estabelecer uma curva única que determine a resistência à compressão do concreto em função da velocidade de onda ultrassônica. A seguir são apresentadas algumas equações de correlação de diversos autores apresentados na dissertação de Gavilán (2011), conforme quadro da Tabela 2.15.

Tabela 2.15 – Quadro de equações de correlação (GAVILÁN, 2011)

Autor	Equação*	f_c para $V=4,1$ km/s
Yun et al. (1988)	$f_c = 0.329V - 1065$	28,4
Almeida (1993)	$f_c = 0.0133 V^{5543}$ $f_c = 0.011 V^{5654}$	33,1 32,1
Gonçalves (1995)	$f_c = 0.02V - 65.4$	16,6
Soshiroda e Voraputhaporn (1999)	$f_{c28} = 44.52 V_1 - 126.83$	55,7
Pascale et al.(2000)	$f_c = 10^{-28} V^{8.1272}$	23,0
Qasrawi (2000)	$f_c = 36.72V - 129.077$	21,5
* " f_c " expressado em "MPa" e " V " expressado em "km/s"		

No caso de uma velocidade de 4,1 km/s o valor de resistência tem uma variação de 16,6 MPa a 55,7 MPa.

Porém o ensaio possibilita estimar a resistência à compressão do concreto, tanto em corpos de prova moldados durante a concretagem, quanto em testemunhos e na própria estrutura, no caso que seja feita a correlação previa, com as limitações indicadas sobre as variações da velocidade nas primeiras idades.

2.3.2.3 Método *Pull-Out*

Conhecido como ensaio de arrancamento de pino, o Método *Pull-Out* está baseado no princípio de que ao se arrancar um elemento fixado ao concreto, pode-se estimar a resistência à compressão do concreto, desde que ela esteja relacionada ao fatores que definem a ruptura do concreto, como a resistência à tração ou ao cisalhamento. Dessa forma, um esquema desse ensaio é apresentado na Figura 2.22.

O procedimento desse ensaio é descrito na ASTM C900-15 e na UNE-EN 12504-3:2006, os pinos são fixados nas fôrmas, tendo o cuidado de deixar uma extremidade rosqueada livre para fixar o aparelho de arrancamento.

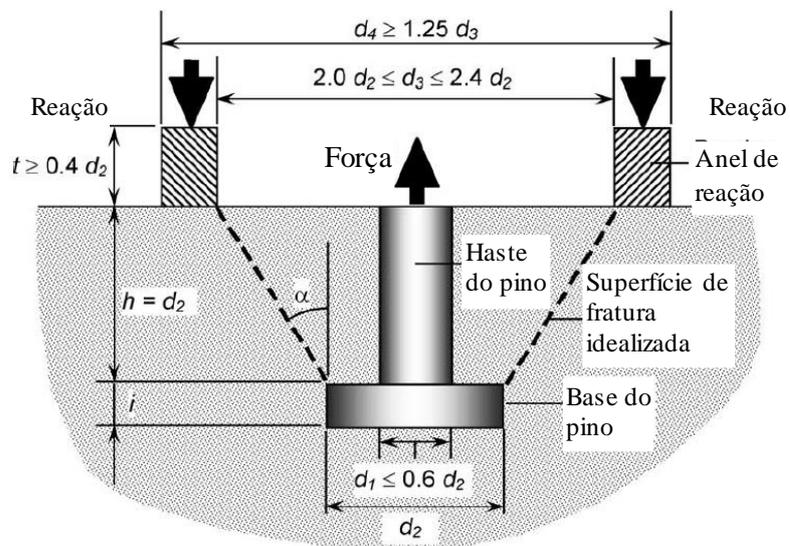


Figura 2.22 – Sistemática de funcionamento do ensaio de arrancamento de pino (baseado em: ASTM C900-15)

O LOK-TEST é um dos equipamentos que se encontra espalhado no meio técnico dos ensaios não destrutivos. O conjunto de imagens da Figura 2.23 mostra o equipamento para a realização dos ensaios. A Figura 2.24 mostra a tipologia de dano no concreto.



Figura 2.23 – Partes do equipamento LOK-TEST (GERMANN INSTRUMENTS, 2015)



Figura 2.24 – Equipamento LOK-TEST tipo de falha do concreto (GERMANN INSTRUMENTS, 2015)

De acordo a Bungey (2005) na maior investigação feita em escala real em estruturas de concreto armado conhecido como The European Concrete Building Project (ECBP, 2000), e onde, uma área do estudo foi a determinação da resistência do concreto “*in loco*” às primeiras idades, assinala que o ensaio de arrancamento *pull-out test* é o método recomendado, baseado na forte correlação entre a força de arrancamento e a resistência à compressão do concreto.

A Norma ASTM C900-15 indica que uma correlação previa deve ser feita antes do uso do equipamento com o concreto que está sendo testado. Na mesma direção a UNE-EN 12504-3:2006 (AENOR, 2006) também assinala a necessidade de fazer a correlação previa, complementando que a curva típica obtida pode servir para o intervalo usual de resistência do concreto em estruturas.

Para isso, os fabricantes fornecem uma curva de calibração para obter a resistência do concreto com a força de arrancamento dos equipamentos.

A Figura 2.25 mostra um exemplo de aplicação do ensaio de arrancamento apresentado por Bungey (2006), onde é apresentada uma curva de correlação entre a força de arrancamento e a resistência à compressão, mostrando o efeito de diferentes calibrações realizadas em laboratório e em campo, utilizando cubos de 150 mm e na própria estrutura de concreto.

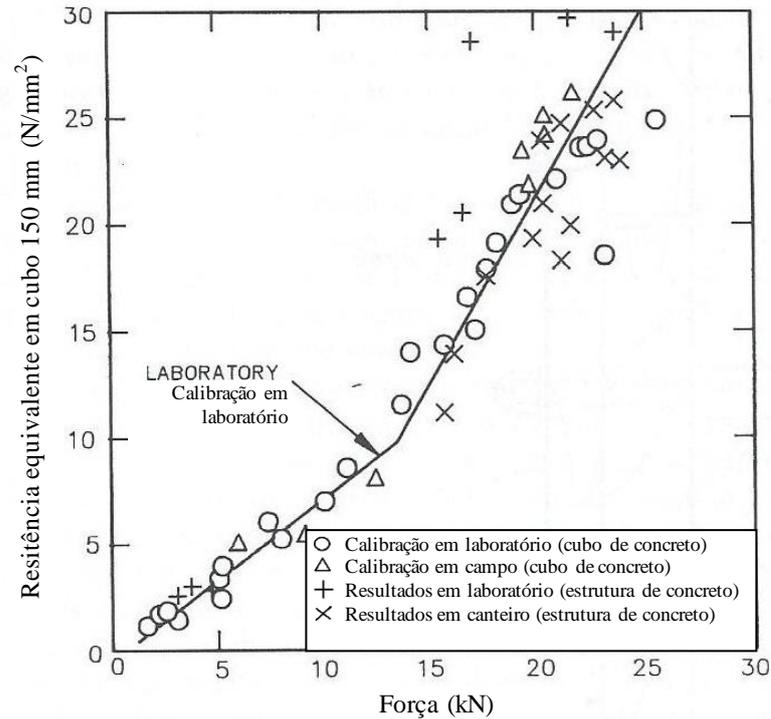


Figura 2.25 – Exemplo de aplicação da correlação entre a força de arrancamento e a resistência à compressão, mostrando o efeito de diferentes calibrações realizadas em laboratório e em canteiro, utilizando cubos de concreto e uma estrutura de concreto (baseado em: BUNGEY, 2006)

Outro parâmetro relacionado ao ensaio de pull-out que deve ser levado em consideração é a variabilidade dos resultados, de acordo a ASTM C900-15, no caso dos ensaios *in loco* feitos em concreto agregados graúdo de tamanho máximo 19 mm, o limite dos testes individuais, expressados como porcentagem da média, não devem ultrapassar os valores indicados na Tabela 2.16.

Tabela 2.16 – Limites aceitáveis segundo a quantidade de ensaios

Quantidade de ensaios	Limite aceitável (% da média)
5	31
7	34
10	36

(fonte: ASTM C900-15)

Malhotra e Carino (2004) e Keiller (1982) indicam que o coeficiente de variação pode alcançar valores de até 15 % dependendo do agregado empregado.

Por fim, o ACI 228.1R-03 (ACI, 2003) quanto trata o assunto do ensaio do concreto nas primeiras idades mostra um exemplo com a utilização do ensaio *pull-out*.

2.3.3 Novos Ensaio para Averiguação da Resistência nas Primeiras Idades

Atualmente e como sempre acontecem para o desenvolvimento de novos equipamentos de ensaios que buscam satisfazer as necessidades do mercado, eles são desenvolvidos em laboratórios da universidade ou das empresas do setor de ensaios não destrutivos. Hoje os enfoques das pesquisas se encontram na direção de monitorar o processo de pega do concreto, fazendo medições principalmente no relacionado com a resistência que oferece o concreto para o passo de uma corrente elétrica, a seguir são apresentados os resultados de algumas pesquisas na atualidade.

Tawie e Lee (2010) propõem monitorar o processo de endurecimento do concreto, pelo uso de técnicas eletro-mecânicas de impedância, concluindo que uma vez que é feita a correlação entre a impedância e a resistência à compressão do concreto, ela pode ser utilizada para fazer uma estimativa em diversas idades do concreto. A Figura 2.26 a seguir mostra a configuração esquemática do ensaio e seus equipamentos.

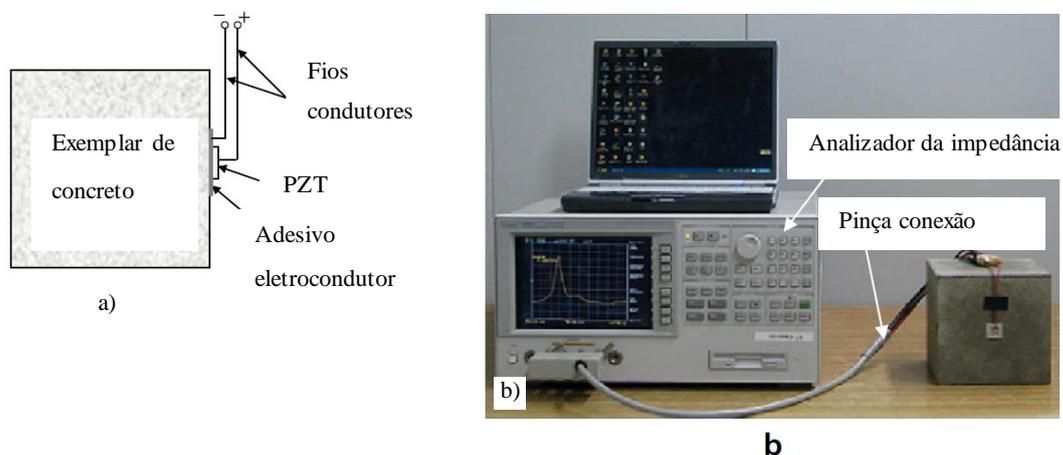


Figura 2.26 – Ensaio: a) configuração PZT (transdutor piezoelétrico) e b) ensaio de medição da impedância (baseado em: TAWIE; LEE, 2010)

Wei et al. (2012) propõem a determinação da resistência do concreto à compressão mediante a medição da resistividade elétrica do concreto, com a particularidade do uso de um equipamento de resistividade sem contato, diferentes dos equipamentos comerciais disponíveis. Eles concluíram que a relação entre as duas variáveis é linear, mesmo desde as 24

h, e, portanto, ela pode ser utilizada para fazer uma estimativa em diversas idades do concreto. A Figura 2.27 a seguir mostra o equipamento utilizado na realização desse ensaio.

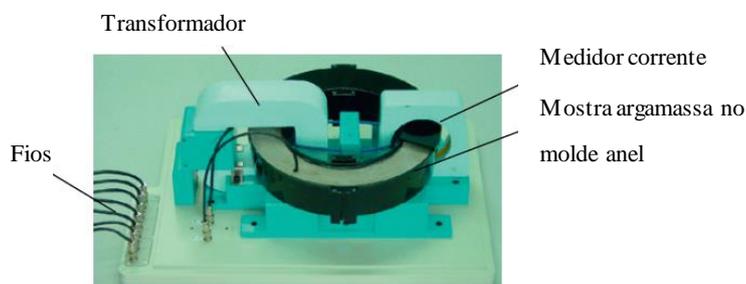


Figura 2.27 – Equipamento para medir a resistividade elétrica do concreto sem contato (baseado em: WEI et al., 2012)

Yeon et al. (2013) propõem a medição do coeficiente de expansão térmica do concreto “*in loco*” para monitorar o processo de endurecimento do concreto, concluindo que a variação do coeficiente está fortemente relacionada com a resposta da resistência do concreto. A Figura 2.28 mostra o esquema da instrumentação proposto.

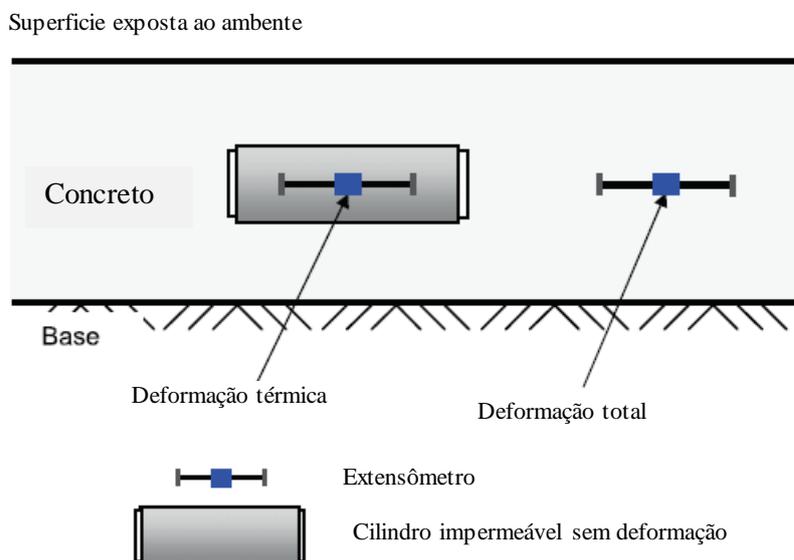


Figura 2.28 – Esquema da instrumentação do coeficiente de expansão térmica (baseado em: YEON et al., 2013)

Encerrando este capítulo, destaca-se o Projeto APULOT (*Appropriate Pull-Out Test*) que é baseado no ensaio de aderência *pull-out test* e na relação existente entre resistência à compressão do concreto e a tensão de aderência. A tese procura o estabelecimento da

recomendação do ensaio, para que possa ser implantado e vir a ter sucesso nos canteiros de obra, visando validar e consolidar os ensaios em condições reais, tendo em consideração os aspectos técnicos e práticos para uma adequada implementação, para a determinação da resistência “*in loco*” do concreto às primeiras idades, complementando o ensaio com a medição de maturidade do concreto, que vai permitir conhecer o momento certo para fazer o teste de arrancamento. No capítulo 3 é apresentado o Projeto APULOT e nos capítulos 4 e 5 encontra-se o programa experimental feito com o novo ensaio e seus resultados. Finalmente no capítulo 6 se apresenta a implementação do ensaio nos canteiros de obra.

3 RELAÇÃO ENTRE ADERÊNCIA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica referente às investigações da tensão de aderência entre aço e concreto e da resistência à compressão do concreto nas primeiras idades.

3.2 INÍCIO DO CONCRETO ARMADO E ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO

Segundo Calavera (2003) os grandes pioneiros do concreto armado são os franceses Monier e Hennebique nos anos 1860 e 1890, criando patentes para sua utilização. O emprego do concreto armado como material estrutural depende da resistência e da permanência do vínculo existente entre o concreto e o metal de reforço e, por esta razão, a tensão de aderência tem recebido muita atenção dos engenheiros e pesquisadores. Desde 1876, quando Thaddeus Hyatt fez os primeiros testes para determinar a aderência entre o concreto e o aço.

Foi também nesta época que surgiram as primeiras normas sobre o novo material, Concreto Armado, conforme ilustra o quadro da Figura 3.1 abaixo. No Brasil a primeira norma foi a NB-1:1940.

Aparecimento dos primeiros regulamentos concretos estruturais	
1903	Switzerland. "Provisorische Normen für Projektierung, Ausführung und Kontrolle von Bauten armiertem Beton (EMPA)".
1904	Prussia. "Bestimmungen für die Ausführung von Konstruktion aus Eisenbeton im Hochbau".
1906	France. "Circulaire du ministre des travaux Publics, des postes et des télégraphes aux ingénieurs en-chef des Relatives à l'emploi du Béton Armé".
1907	United Kingdom. "Report of the Joint Committee on Reinforced Concrete". (Unofficial)
1910	USA. "Standard Building Regulations for the Use Reinforced Concrete".

Figura 3.1 – Quadro dos primeiros regulamentos dos concretos estruturais. (Fonte: Calavera, 2003)

O Relatório N°48-2001 do *Concrete Reinforcing Steel Institute (CRSI)*, menciona que as barras de aço surgiram em 1900 e a primeira especificação desenvolvida pela *American Steel Manufacturers* foi em 1910. A ASTM aprovou em 1911, a Norma A15 for *billet-steel*¹ *concrete reinforcing bar*.

A Tabela 3.1 faz um resumo das especificações de barras de aço da ASTM desde 1911 até o ano 2000.

Tabela 3.1 – Resumo das especificações de barras de aço de 1911 até 2000, de acordo com as especificações da ASTM, com rendimento mínimo e resistência mínima à tração em “MPa” (Fonte: CRSI, 2001).

ASTM Especificações	Anos		Tipo de aço	Grau 33 (Estrutural)		Grau 40 (Intermédio)		Grau 50 (Duro)		Grau 60		Grau 75	
	Iniciação	Fim		Límite elástico mínimo	Tensão mínima								
A15	1911	1966	Billet	227	379	275	482	345	550				
A408	1957	1966	Billet	227	379	275	482	345	550				
A432	1959	1966	Billet							413	620		
A431	1959	1966	Billet									517	690
A615	1968	1972	Billet			275	482			413	620	517	690
A615	1974	1986	Billet			275	482			413	620		
A615	1987	Presente	Billet			275	482			413	620	517	690
A16	1913	1966	Trilho					345	550				
A61	1963	1966	Trilho							413	620		
A616	1968	1999	Trilho					345	550	413	620		
A160	1936	1964	Eixo	227	379	275	482	345	550				
A160	1965	1966	Eixo	227	379	275	482	345	550	413	620		
A617	1968	1999	Eixo			275	482			413	620		
A996	2000	Presente	Trilho, eixo			275	482	345	550	413	620		
A706	1974	Presente	Baixa liga							413	620		
A955M	1996	Presente	Inoxidável			275	482			413	620	517	690

Foi na década de 60 que deu início o processo para aumentar os valores das resistências dos aços. A seguir, na Figura 3.2, são mostrados alguns tipos de barras do aço nos anos 1910, do relatório mencionado.

¹Aço, diretamente produzido a partir de lingotes ou continuamente fundido, feito a partir de aquecedores devidamente identificados de forno aberto, oxigênio básico, ou aço elétrico de alto forno, ou lista de aço Bessemer ácido e em conformidade com os limites especificados na composição química (ACI CONCRETE TERMINOLOGY, 2013).

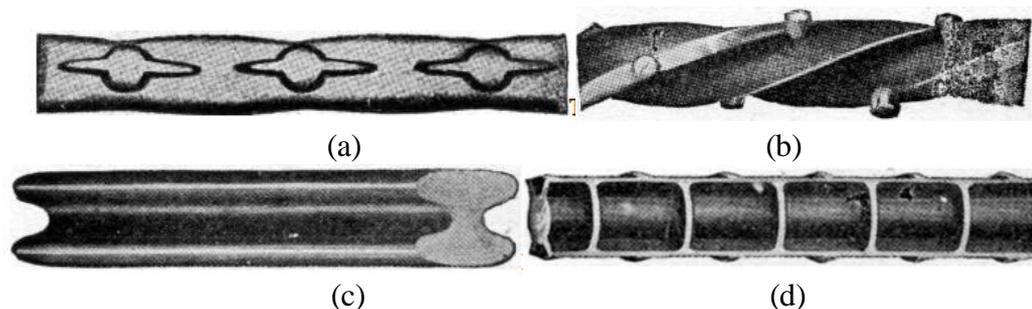


Figura 3.2 – Tipos de barras de aço em 1910; a) *Thatcher Bulb Bar*, b) *Twisted Lug Bar*, c) *Monolith Bar* e d) *Cup Bar* (Reporte N°48-2002 CRSI)

Abrams (1913) realizou 1.500 ensaios de aderência do tipo *pull-out* para verificar a influência das variáveis inerentes à resposta do teste. A amplitude do estudo realizado mostra o nível significativo de compreensão de Abrams sobre o assunto da aderência, uma vez que os aspectos pesquisados, ainda hoje, após mais de 100 anos, estão sendo estudados. Também o tipo de ensaio feito nas investigações é muito similar ao ensaio recomendado pela RILEM/CEB/FIP RC6 (1983). Na Figura 3.3 é observado que a tensão próxima à superfície é maior.

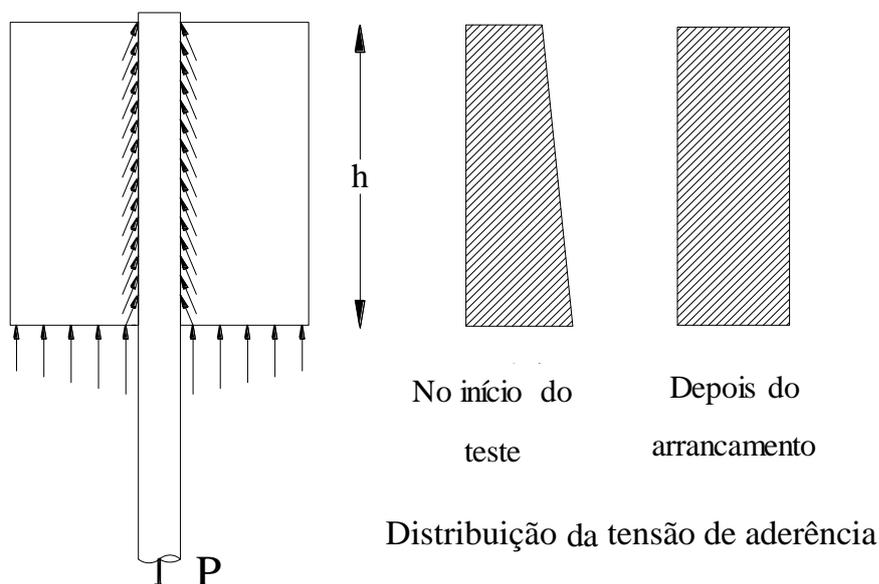


Figura 3.3 – Modelo *pull-out* cúbico com “h” próximo a 200 mm e distribuição das tensões no corpo de prova para o ensaio *pull-out* (baseado em: ABRAMS, 1913)

Entre os efeitos das variáveis estudadas por Abrams (1913), destacam-se os:

- a) da variação das dimensões dos corpos de prova;
- b) do diâmetro e da condição da superfície da barra de aço;
- c) da condição da cura do corpo de prova;
- d) do tipo de nervura;
- e) da idade, do tipo de mistura e da resistência do concreto;
- f) do gancho final da barra de aço;
- g) da posição da barra de aço durante a concretagem;
- h) da reaplicação da carga do ensaio depois da falha da aderência.

A Tabela 3.2 a seguir mostra as quantidades de ensaios *pull-out test* e *beam test* para a determinação dos pontos da pesquisa, e a Figura 3.4, os tipos de barras de aço utilizados na mesma.

Tabela 3.2 – Distribuição da quantidade de ensaios *pull-out*.

Item	Quantidade de Ensaio
Efeito da variação das dimensões dos corpos de prova.	163
Efeito do diâmetro e a condição da superfície da barra de aço.	90
Efeito da condição de cura do corpo de prova	189
Efeito do tipo de nervura.	116
Efeito da idade, mistura e resistência do concreto.	265
Efeito do gancho final da barra de aço.	97
Miscelâneas de diversos ensaios.	357
Comparação pull-out test e beam test.	223
Total	1500

(Fonte: ABRAMS, 1913)

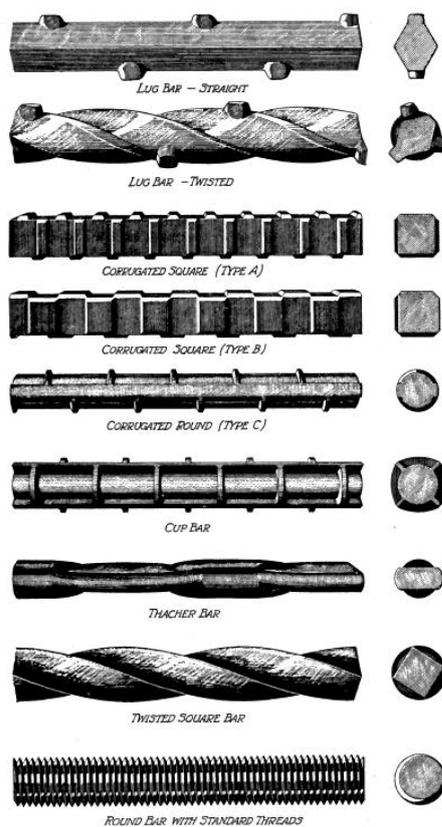


Figura 3.4 – Configurações geométricas das barras de aço utilizadas (ABRAMS, 1913)

Para o estudo da efetividade do tipo de ancoragem da barra de aço, fez-se uma variedade de ensaios, incluindo a utilização de porcas e arruelas, curva de meia e um quarto de volta, além das curvas numa faixa de 45° a 180° , conforme Figura 3.5.

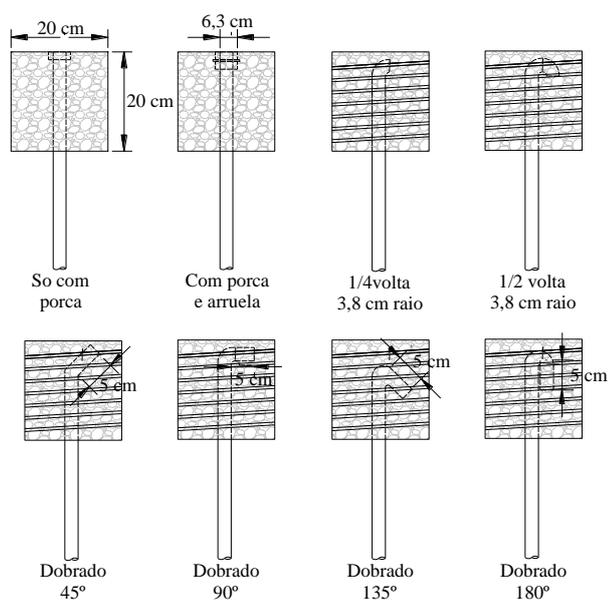


Figura 3.5 – Variações da ancoragem do aço no concreto (baseado em: ABRAMS, 1913)

Os resultados da relação da resistência à compressão do concreto com a tensão máxima de aderência é são mostrados na Figura 3.6.

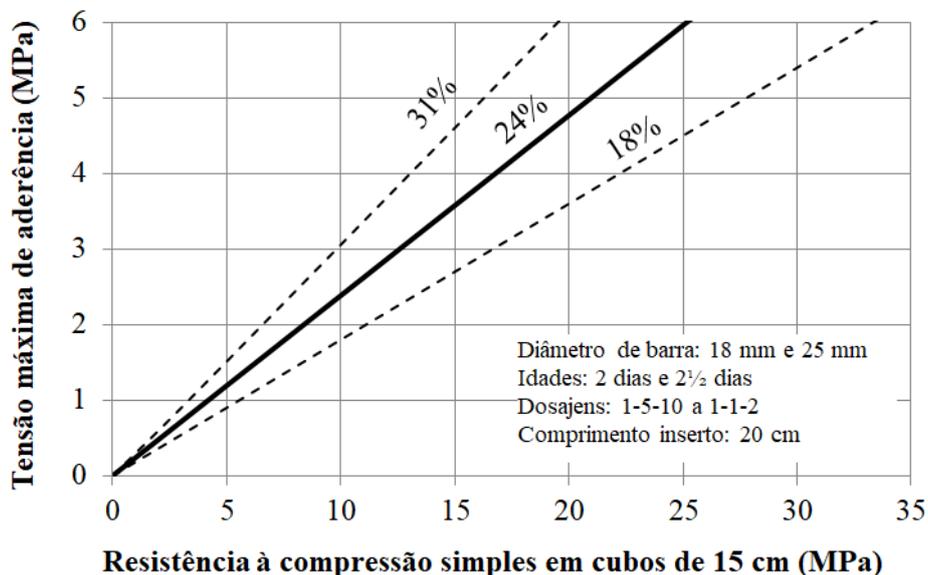


Figura 3.6 – Correlação entre a resistência à compressão do concreto e a resistência máxima de aderência aço-concreto (baseado em: ABRAMS, 1913)

Outro pesquisador que fez um estudo sobre a influência de alguns fatores na aderência, similar ao estudo de Abrams (1913), foi Menzel (1939). Sua pesquisa está baseada em ensaios de aderência feitos num período compreendido entre 1912 e 1937. No seu artigo assinala que, no concreto armado, um pequeno volume de aço está embutido num grande volume de concreto. Uma vez que o aço é um material muito mais resistente que o concreto, é possível, para um pequeno volume de aço adequadamente incorporado, poder transferir uma grande proporção da carga aplicada sobre o concreto que envolve o aço. A transferência de carga ou tensão do concreto para o aço torna-se possível pela resistência estabelecida entre o concreto e a superfície da barra de aço inserto.

Da mesma forma, ele estabelece uma relação entre a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de 200 mm x 200 mm e a tensão máxima da aderência no ensaio *pull-out* utilizando corpos de prova cúbicos com, aproximadamente, “h” de 200 mm, conforme gráficos da Figura 3.7.

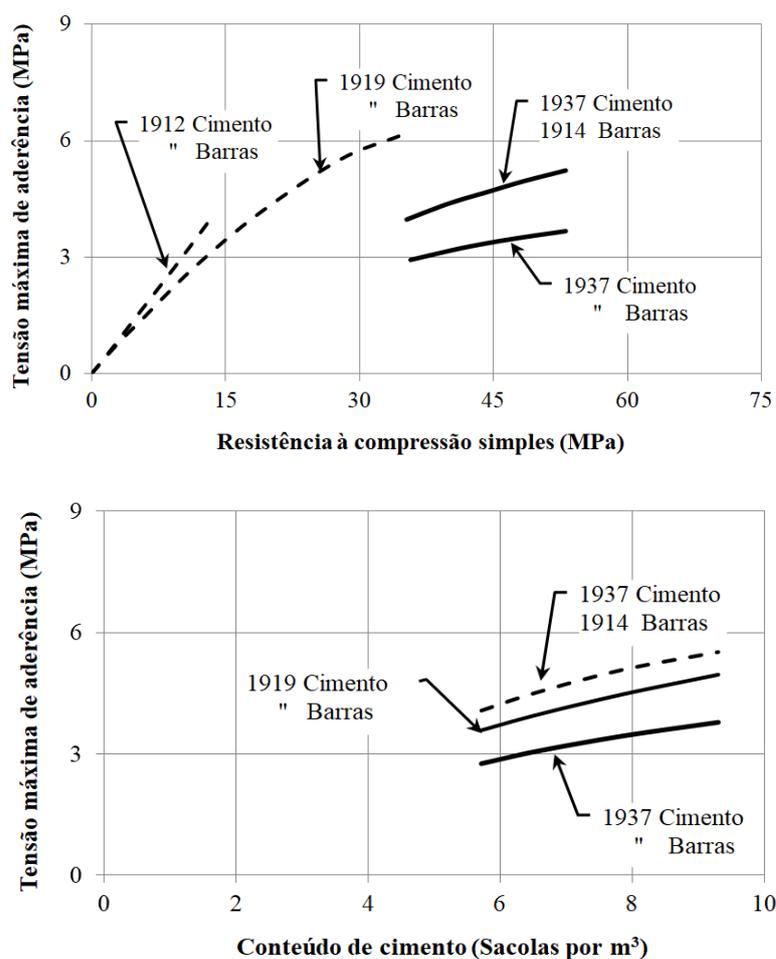


Figura 3.7 – Correlação entre a resistência à compressão do concreto e a resistência máxima de aderência aço-concreto, no período 1912-1937 (baseado em: MENZEL, 1939)

A influência do confinamento da barra de aço foi estudada em diversas configurações mostradas na Figura 3.8. Os corpos de prova com cobrimentos de 5 cm mostraram tensões maiores que as outras configurações.

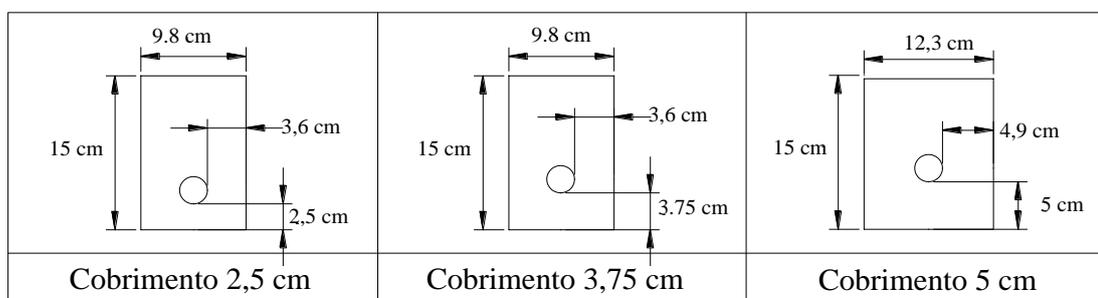


Figura 3.8 – Configurações do ensaio *pull-out*, com diferentes cobrimentos de barras de aço (baseado em: MENZEL, 1939)

Muitas investigações foram realizadas ao longo do tempo, além das mencionadas nos parágrafos anteriores, aprofundando diversos aspectos que afetam a aderência, destacando entre eles a primeira publicação do ACI 408, de 1966. Nela foi destacada a importância do fendilhamento do concreto no fenômeno da aderência. A publicação foi atualizando-se até hoje na ACI 408R-13 (ACI, 2013).

3.3 TIPOS DE AÇO PARA CONCRETO NA EUROPA E NOS EUA NO INÍCIO DO CONCRETO ARMADO

De acordo com Calavera (2003), no início da utilização do concreto armado, entre os EUA e Europa tinha uma diferença muito importante. Enquanto na Europa os esforços eram no caminho de obter barras de aço com uma resistência cada vez maior, nos EUA o objetivo era obter barras de aço com diversidade de nervuras, procurando garantir uma aderência cada vez mais alta. Os trabalhos de Abram (1913) e Menzel (1939), apresentados no item anterior, confirmam essa ideia, no sentido da diversidade de tipos aço com nervuras estudadas. Também na Tabela 3.1 pode-se conferir que na década dos 60, nos EUA inicia-se o processo para acrescentar os valores das resistências dos aços.

Com relação à nervura em barras de aço, Calavera (2003) diz que até a década dos 80 ainda na Europa os usos das barras de aço lisas eram muito frequentes. Um fato importante foi a introdução do aço Ysteg da Austria, que tinha uma resistência de aproximadamente 400 N/mm^2 , com nervuras produzidas no processo da torção e estiramento de duas barras, e, portanto, a resistência de aderência melhorava. Depois o sistema foi mudando obtendo diversas configurações de barras de aço, conforme Figura 3.9, chegando até o tipo da barra utilizada na atualidade.

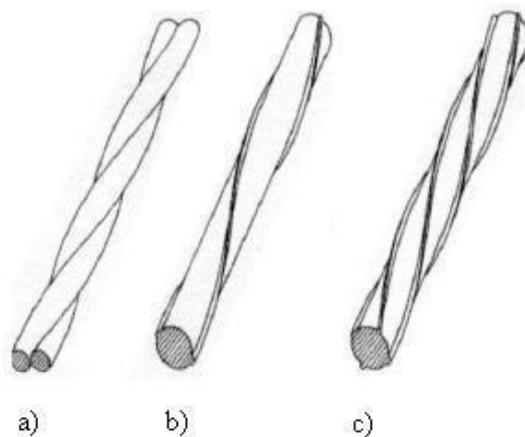


Figura 3.9 – Tipos de barras de aço na década de 80: a) YSTEG, b) Tor-40 e c) Tetracero-42 (baseado em: CALAVERA, 2003)

Concluindo este breve resumo histórico sobre o início do concreto armado como material e o estudo inicial da aderência aço-concreto, é importante mencionar que de acordo com Calavera (2003) até a década de 80, nas escolas de Engenharia, se ensinava que o êxito do concreto armado se fundamentava no fato da semelhança do coeficiente de dilatação do aço e do concreto. Hoje o êxito já é atribuído ao fenômeno da aderência, que é quem garante a compatibilidade entre os dois materiais.

3.4 MECANISMO DA ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO

Segundo o ACI 408R-13 (ACI, 2003), a transferência de forças de uma barra nervurada para o concreto circundante ocorre por três mecanismos:

- a) aderência por adesão físico-química entre a barra e o concreto (F_a);
- b) aderência pela força de atrito resultantes da rugosidade da interface, forças transversais à superfície da barra e deslizamento relativo entre a barra e o concreto envolvente (F_f);
- c) aderência pela ancoragem mecânica ou intertravamento das nervuras contra a superfície do concreto (F_m).

A Figura 3.10 ilustra uma representação esquemática dos mecanismos indicados.

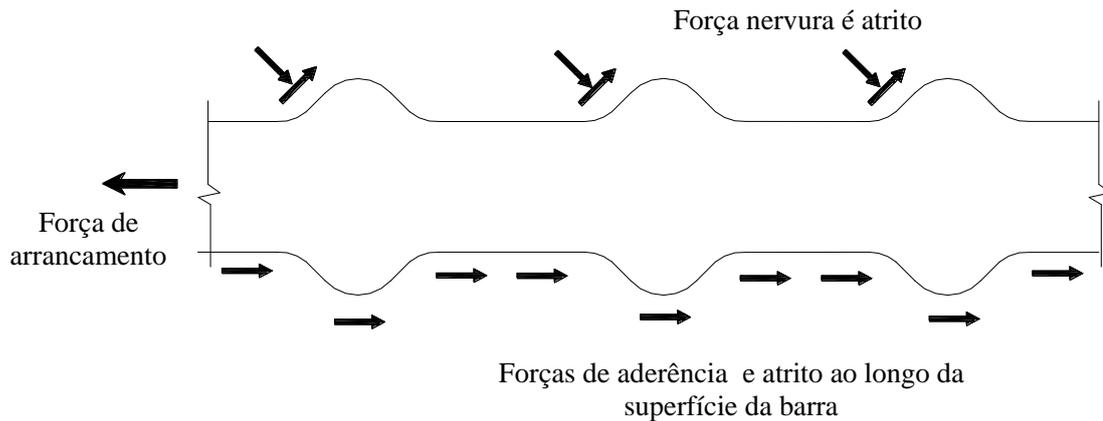


Figura 3.10 – Mecanismos de transferência das forças de aderência (baseado em: ACI, 2013) (baseado em: Lutz e Gergelk, ACI, 1967)

Na realidade, a separação da aderência nas três parcelas acima indicadas é meramente esquemática, não sendo possível determinar-se cada uma delas isoladamente. Além disso, a aderência de uma barra de aço ao concreto que a envolve é um valor puntual, sendo fortemente influenciado pela retração, pela fluência e pela fissuração do concreto. Desse modo, por meio de ensaios, são determinados valores médios globais de aderência, que são suficientes para efeito de projeto não havendo necessidade de um estudo em uma escala microscópica (FUSCO, 2013).

A adesão físico-química é produzida pelas forças capilares e moleculares geradas na superfície da barra. O ACI 408R-03 (ACI, 2003) diz que quando a barra tem um deslocamento com respeito ao concreto circundante, a adesão físico-química na superfície da barra é destruída. Enquanto ao mesmo tempo forças nas nervuras e forças de atrito sobre a barra de aço são mobilizadas, as forças de compressão sobre as nervuras aumentam o valor das forças de atrito.

A Figura 3.11 (TASTANI; PANTAZOPOULOU, 2010) ilustra uma representação esquemática do deslocamento da barra de aço.

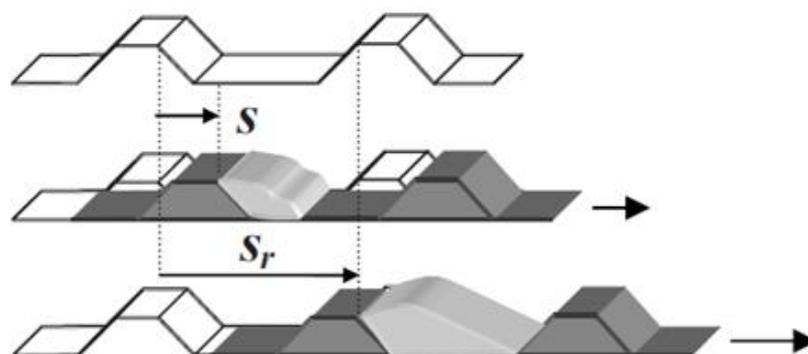


Figura 3.11 – Esmagamento contínuo do concreto na frente da nervura enquanto ocorre o deslizamento da barra de aço, em que a cor cinza indica a posição da nervura deslocada (baseado em: TASTANI; PANTAZOPOULOU, 2010)

A medida que aumenta o deslizamento, o atrito na barra de aço é reduzido, deixando que as forças existentes entre as faces de contato entre as nervuras e o concreto circundante sejam o principal mecanismo de transferência da força.

3.5 EQUILÍBRIO DAS TENSÕES

As forças sobre a superfície da barra estão em equilíbrio com uma tensão de compressão e de corte sobre as superfícies de contato do concreto, que resultam em tensões de tração, e que podem resultar em fissuras em planos que são perpendiculares e paralelos ao reforço, como é mostrado na Figura 3.12.

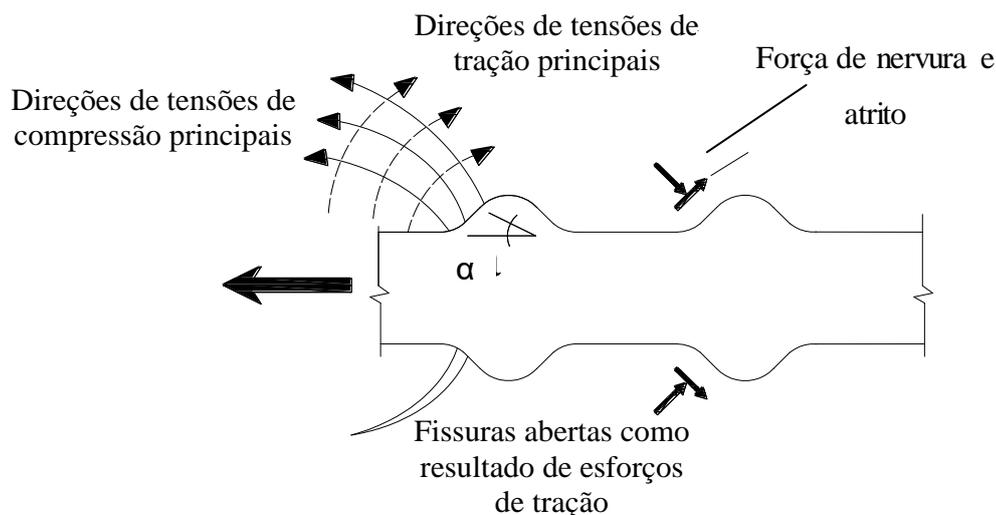


Figura 3.12 – Vista lateral de uma barra com ângulo da nervura da barra “ α ” mostrando formação de fissuras (baseado em: GOTO, 1971 apud ACI, 2013)

Tastani e Pantazopoulou (2010) fazem um aprofundamento sobre as tensões geradas no momento da tração da barra de aço. De acordo ao esquema da Fig 3.13, a pressão confinante normal “ σ_n ” pode ser calculada através do estabelecimento da força de equilíbrio ao longo de um plano diametral de um cilindro vazio de espessura “ c ” que idealiza o concreto em torno da barra, sendo a sua espessura a dimensão da menor cobertura em cima da barra, como mostrado na Figura 3.13.

O termo “ σ_n ” abrange uma contribuição das tensões no aro da cobertura de concreto “ σ_c ” e a reação de qualquer armadura transversal, ou seja, estribo, cruzando o plano de divisão “ σ_{st} ”. No entanto sabe-se, a partir da observação experimental, que para pressões confinantes mais elevadas, a mudança do modo de falha pode ser uma mistura entre o fendilhamento e o arrancamento, e no caso do confinamento excessivo, pode ser observada uma falha de arrancamento.

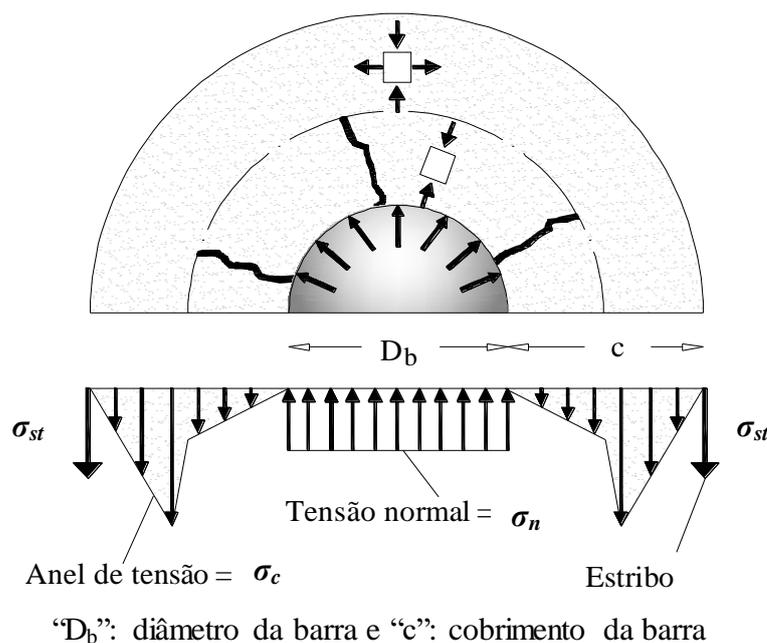


Figura 3.13 – Tensões transversais em torno de uma barra sendo puxada (baseado em: TASTANI; PANTAZOPOULOU, 2010)

Fazendo uma análise do estado de tensão na vizinhança de uma nervura, a Figura 3.14, mostra o limite da magnitude da pressão confinante “ σ_n ”, para além do qual há aumento de força adicional, que pode ser obtida no mecanismo de fricção, devido à alteração no modo de falha. Na face ortogonal de um setor elementar na vizinhança da barra, a compressão local “ σ_3 ” atua diretamente sobre a nervura. A pressão de confinamento “ σ_n ” é a tensão radial.

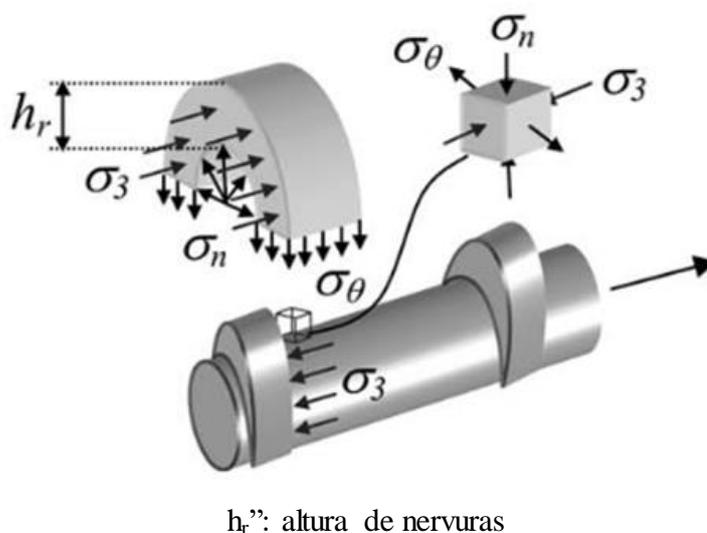


Figura 3.14 – Estado de tensões de uma porção de concreto diante de uma nervura (baseado em: TASTANI; PANTAZOPOULOU, 2010)

Um possível plano de falha ocorre ao longo da superfície cônica inclinada que se estende a partir da ponta de uma nervura para a base da próxima, como é mostrado na Figura 3.15. Concluindo que a tensão na direção do aro “ σ_θ ” é tração, e, portanto, qualquer tensão de tração “ σ_θ ” nesse sentido é tomada igual a zero depois da fissuração.

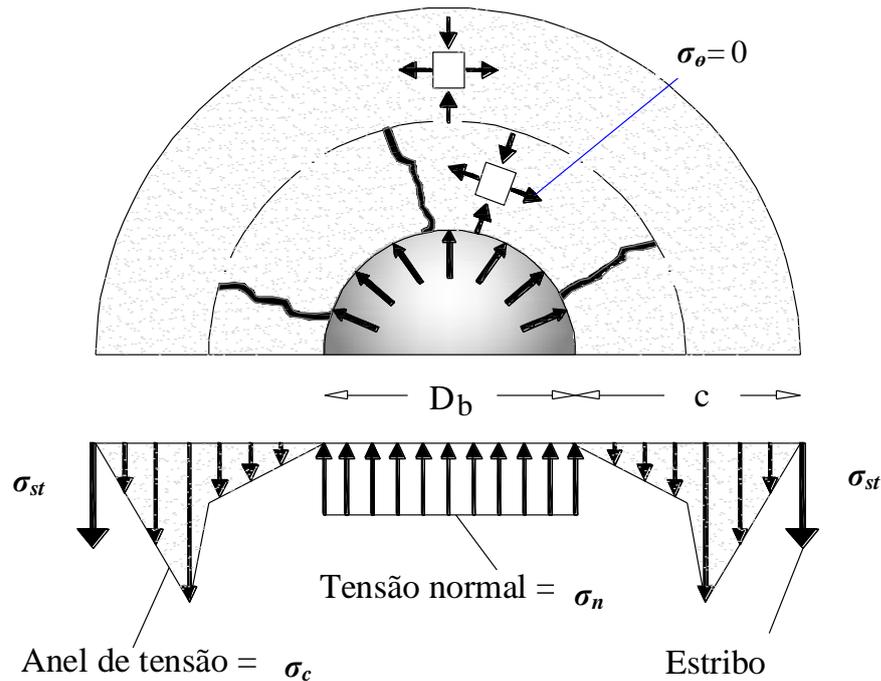


Figura 3.15 – Tensões transversais em torno de uma barra sendo puxada com tensão de tração nula (baseado em: TASTANI; PANTAZOPOULOU, 2010)

3.6 DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES

Dahlgren e Svensson (2013) explicam que sob a ação da força de tração “ F ”, na barra, atua a tensão “ σ_s ” (“*steel*”), sendo mobilizadas tensões de aderência “ τ_b ” (“*bond*”). A tensão diminui à medida que se consideram seções mais afastadas do ponto de entrada da barra de aço no bloco de concreto. Para forças moderadas, os aumentos do deslizamento encontram-se em relação ao aumento da tensão de aderência, segundo Figura 3.16.

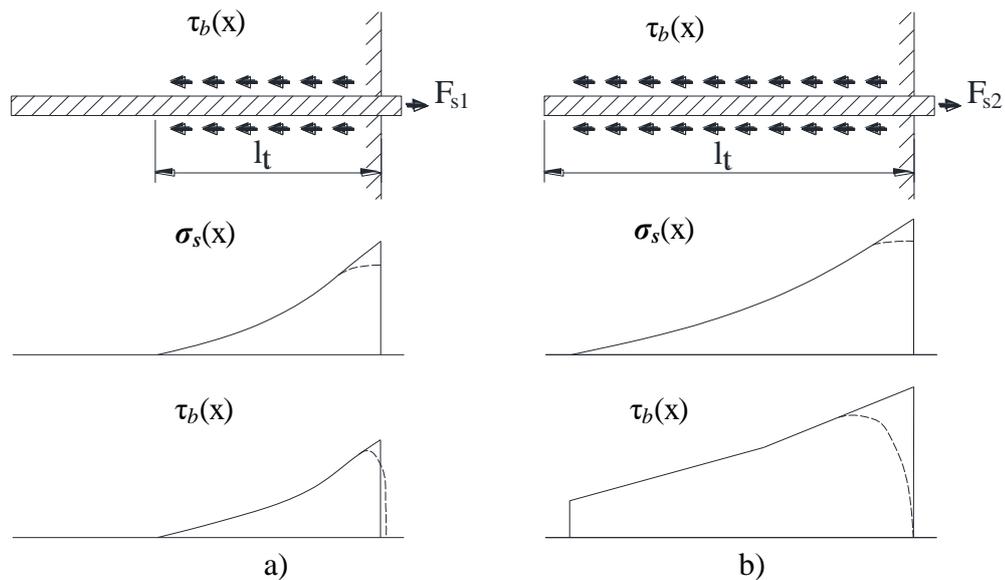


Figura 3.16 – Distribuição de tensões no aço e no concreto, devido à transferência de forças entre os materiais (baseado em: ENGSTRÖM et al., 2011 apud DAHLGRE; SVENSSON, 2013)

No caso “a)”, com uma força “ F_{s1} ”, a tensão de aderência é desenvolvida sobre uma parte da barra “ l_t ”, comprimento no qual ocorre o equilíbrio das tensões horizontais.

No caso “b)”, com uma força “ F_{s2} ”, a tensão de aderência atua junto a todo o comprimento da barra “ l_t ”, quando uma grande força de tração atua na barra a tensão de aderência e o comprimento de transmissão, ambos têm aumentado também, o que resulta numa grande tensão no aço.

Como $F_{s2} > F_{s1}$, a tensão de aderência é maior no caso “b)”.

Como pode ser visto em “b)”, a tensão de aderência não será zero no final da barra, uma vez que toda a barra está deslizando. No entanto, este não é o caso para a tensão do aço, que tem de ser igual a zero no final da barra.

Uma vista lateral do fenômeno é mostrado na Figura 3.17 tomada do ACI 408R-13 (ACI, 2013).

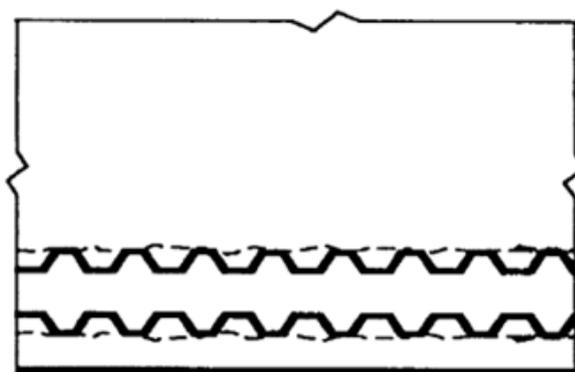


Figura 3.17 – Vista lateral de uma barra mostrando fenda de corte paralela à barra de arrancamento e/ou concreto com esmagamentos locais (ACI, 2013)

Concluindo o tema da transmissão de esforços de aderência em barras nervuradas, é importante assinalar que o efeito de aderência mecânica também está presente nas chamadas barras lisas, em virtude das irregularidades superficiais inerentes ao processo de laminação (FUSCO, 2013). Sobre isso, é apresentada a Figura 3.18 referente aos tipos de acabamentos em barras lisas de aço.

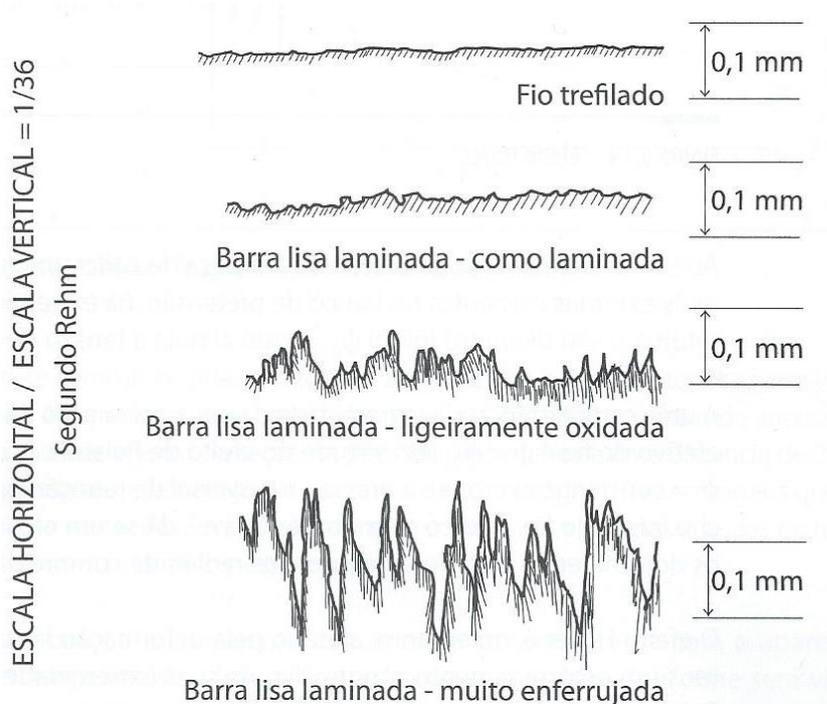


Figura 3.18 – Acabamento superficial de fios e barras lisas (FUSCO, 2013)

3.7 ENSAIO DE ARRANCAMENTO DIRETO (*PULL-OUT TEST*)

A ideia mais simples do ensaio de arrancamento tem mais de cem anos, tendo como referência o trabalho de Abrams (1913), que foi apresentado no Item 3.5.

Na Figura 3.19 são mostrados alguns tipos iniciais de corpos de prova: cilíndricos com e sem astringos e cúbicos. Na Figura 3.20 é apresentada a distribuição das tensões no ensaio de arrancamento.

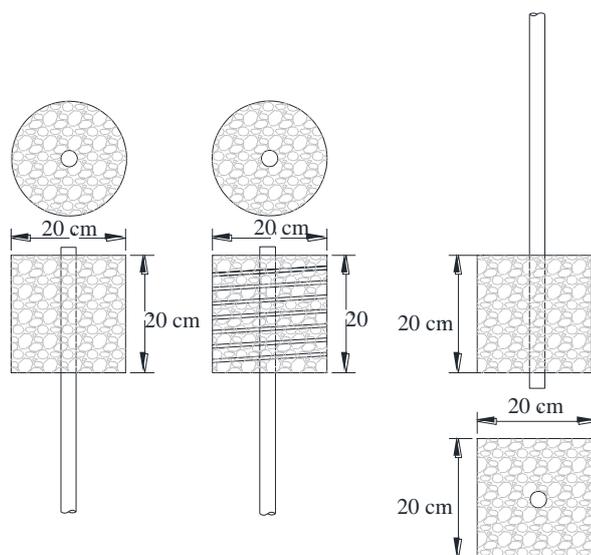


Figura 3.19 – Alguns tipos de ensaios *pull-out* desenvolvidos (baseado em: ABRAMS, 1913)

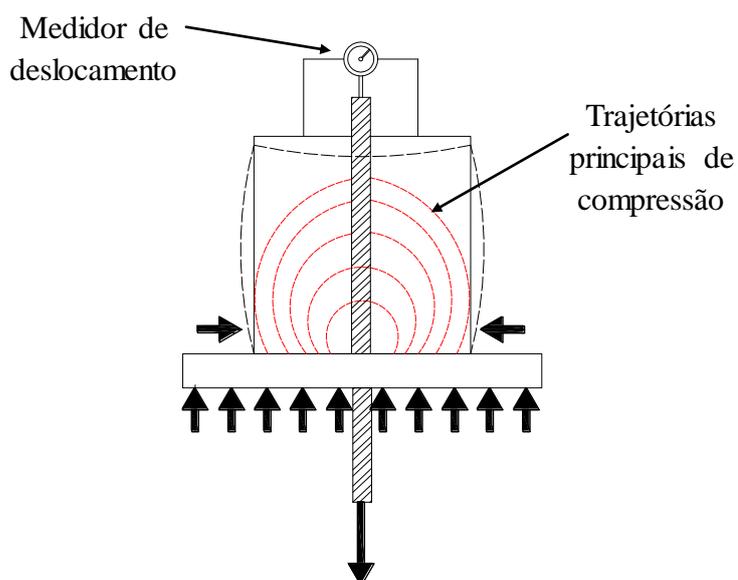


Figura 3.20 – Desenho esquemático do método de ensaio de arrancamento direto

Um detalhe importante do esquema inicial, como se observa na Figura 3.20, é que durante a realização do ensaio, as placas de apoio colocam o concreto sob compressão e os resultados da tensão última de aderência sofrem interferência dele.

Na atualidade, a CSN EN 10080:2005, que foi ratificada em 2012, sobre a base das diretrizes recomendadas na RILEM/CEB/FIP RC6 (CEB, 1983) estabelece o ensaio de arrancamento direto, ou melhor, *Pull-Out Test (POT)*, como o método de validação da aderência de aços para concreto armado, até um diâmetro máximo da barra de 32 mm.

Atendendo à situação indicada, possivelmente tentando minimizar este efeito, a CSN EN 10080:2005, prevê o posicionamento de uma zona não aderida na área de maior compressão antes do comprimento de ancoragem, como e indicado na Figura 3.21.

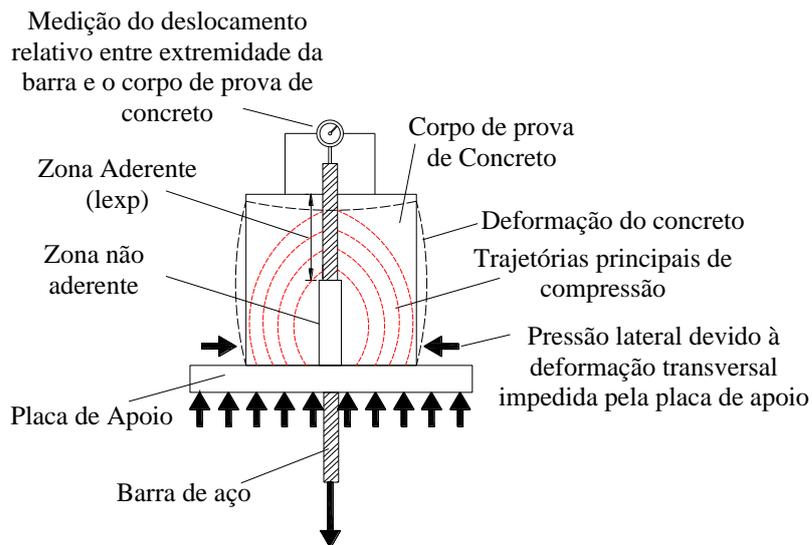


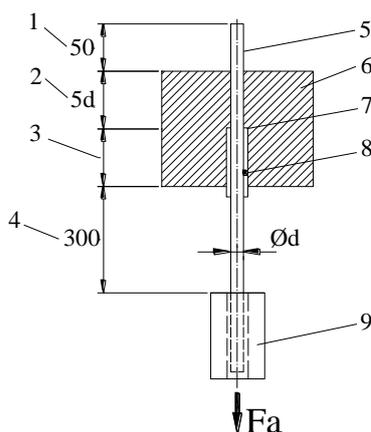
Figura 3.21 – Distribuição da tensão de aderência ao longo da barra (baseado em: LEONHARDT; MÖNNIG, 1993)

O molde para a realização do ensaio é o prismático (cúbico), com dimensões de 10ϕ , sendo o mínimo de 200 mm, com um comprimento aderente de 5ϕ . A resistência à compressão do concreto aos 28 dias de idade é medida a partir de corpos de prova cilíndricos (15 cm x 30 cm), pode ser de 25 ± 5 MPa ou 50 ± 5 MPa. Recomenda-se que, no caso de não ter sido especificado a resistência do concreto, a mesma deve ser de 25 ± 5 MPa, devendo ser feito um mínimo de 25 corpos de prova em duas amassadas. A representação dos componentes desse ensaio é apresentada na Figura 3.22 a seguir. O ensaio deve ser realizado com a velocidade de carregamento constante de acordo ao diâmetro da barra no ensaio, segundo a Equação 3.1.

$$v_p = 0,56d^2 \quad (3.1)$$

Onde:

- a) “ v_p ” é a velocidade de carregamento, em “N/s”;
 b) “ d ” é o diâmetro da barra de aço, em “mm”.



Dimensões em milímetros.

- 1 – Parte externa da barra e ponto de aplicação do dispositivo de medição de deslocamento.
 2 – Comprimento de aderência.
 3 – Comprimento livre de aderência 5d, mín. 200mm – 5d.
 4 – Parte da barra para o ponto de aplicação da força de tração.
 5 – Barra de aço do ensaio.
 6 – Concreto.
 7 – Obturador.
 8 – Separador plástico.
 9 – Mordida de teste da Máquina.

Figura 3.22 – Ilustração dos componentes do ensaio de arrancamento (baseado em: CSN EN 10080:2005)

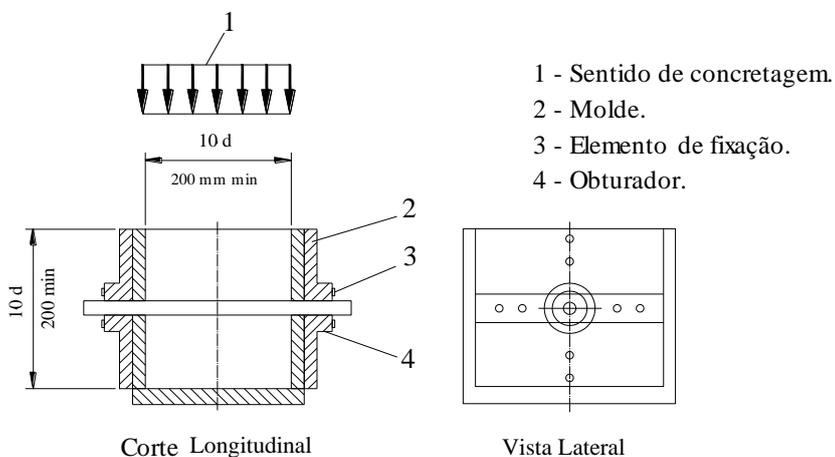


Figura 3.23 – Desenhos esquemáticos do corpo de prova para ensaio (baseado em: CSN EN 10080:2005)

O ensaio *pull-out test (POT)* determina a tensão de aderência “ τ_{dm} ”, desenvolvida durante a aplicação da força “ F_a ” e obtida dividindo a força de arrancamento máxima aplicada para provocar o deslizamento da barra pela superfície lateral de ancoragem da barra de aço, segundo a Equação (3.2).

$$\tau_{dm} = F_a * f_{cm} / (5\pi * d^2 * f_c) \quad (3.2)$$

Onde:

- a) “ τ_{dm} ” é a tensão de aderência, em “MPa”;
- b) “ F_a ” é a força de aderência, em “N”;
- c) “ f_{cm} ” é a resistência à compressão média dos corpos de prova, em “MPa”;
- d) “ d ” é o diâmetro da barra de aço, em “mm”;
- e) “ f_c ” é a resistência à compressão definida no ensaio, de 25 MPa ou 50 MPa.

Finalmente, na CSN EN 10080:2005, está registrada a obrigatoriedade de se indicarem os resultados de resistência à compressão simples do concreto adotado, os resultados individuais da tensão de aderência de cada ensaio, as curvas forças-deslocamentos correspondentes e, também, a descrição da tipologia da falha no relatório do ensaio entre outros dados.

Enquanto o ACI 318S-14 estabelece que o aço com nervuras, para concreto armado, deve cumprir com os requisitos da ASTM A615M/A615 M-09. No caso de aço ao carbono e para avaliação da aderência do ensaio com vigas (*beam test* ou *beam end test*) é vigente a norma ASTM A944-10, já que a norma ASTM C234-91a para o ensaio de arrancamento similar ao CSN EN 10080:2005 foi cancelada no ano 2000 (*withdraw*) e não possui recomendação substituta.

A NBR 7480:2007 com relação à aderência entre aço e concreto, faz a avaliação através do cumprimento do coeficiente de conformação superficial mínimo “ Γ_b ” de acordo com o tipo de aço, indicado na Tabela 3.3 e que a configuração geométrica das barras atenda determinadas exigências, que são representadas na Figura 3.24 logo abaixo (FUSCO, 2013).

Tabela 3.3 – Características mecânicas exigíveis para barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado

Categoria	Ensaio de tração	Aderência
	Resistência Característica de escoamento f_{yk} (Mpa)	Coefficiente de conformação superficial η_b mínimo para $\varnothing \geq 40$
CA-25	250	1
CA-40	400	1,2
CA-50	500	1,5
CA-60	600	-

(fonte: NBR 7480:2007)

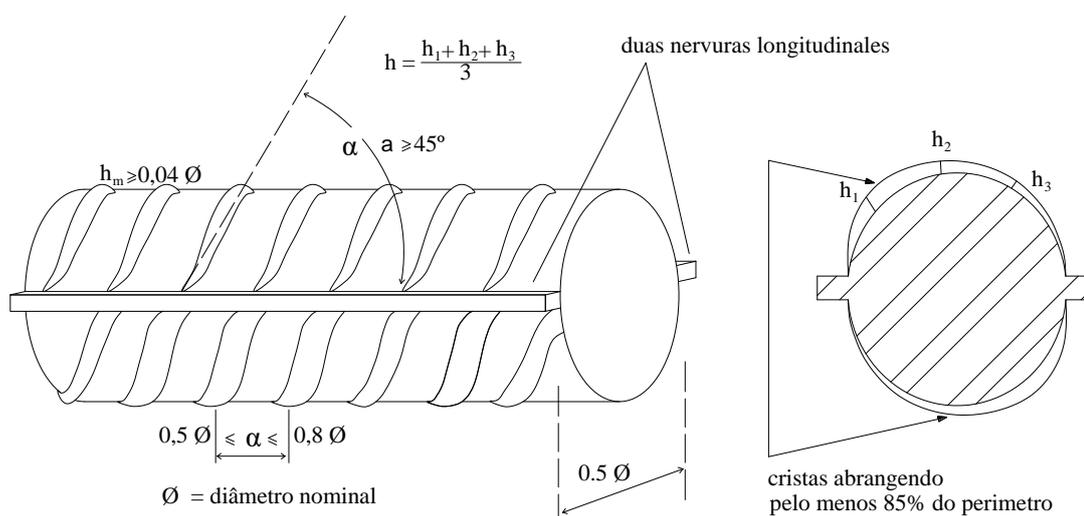


Figura 3.24 – Exigência atual da NBR 7480:2007 (ABNT, 2007b) para barras de alta aderência (baseado em: FUSCO, 2013)

3.8 ADERÊNCIA E FENDILHAMENTO

Como foi explicado nos itens 3.4 e 3.5 sobre as tensões geradas no processo do desenvolvimento da tração da barra de aço no concreto, enquanto é mantida a condição do equilíbrio das tensões, não ocorrerão fissuras, como é mostrado na Figura 3.16 a); mas quando a tensão de tração transversal aumenta até um valor que quebra o equilíbrio das tensões, ocorrerão fissuras em um plano paralelo ao eixo da barra, conforme Figura 3.16 b). A situação mostrada na Figura 3.25 corresponde ao caso em que o cobrimento da barra de aço é pequeno com relação ao seu diâmetro.

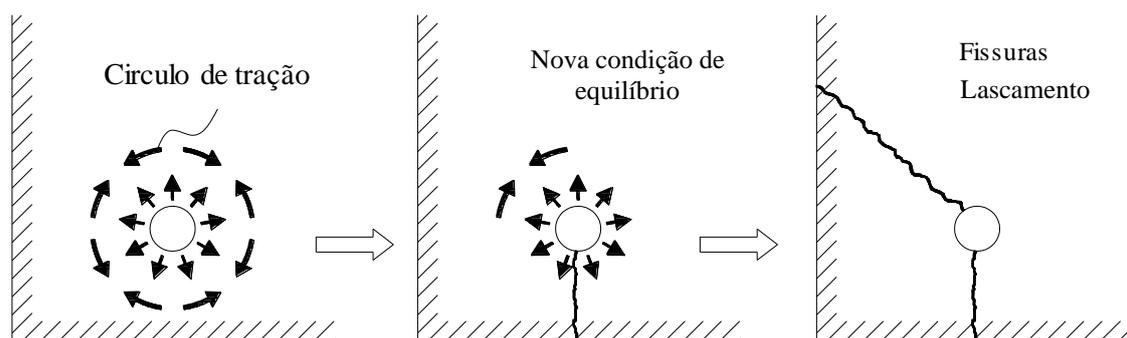


Figura 3.25 – Início e propagação do fendilhamento em um concreto onde o cobrimento é pequeno em relação ao diâmetro da barra de aço (baseado em: ENGSTRÖM et al, 2011 apud DAHLGREN; SVENSSON, 2013)

Como consequência do fenômeno do fendilhamento, segundo Fusco (2013) de modo usual, ao longo das barras ancoradas por aderência, são colocadas armaduras transversais que absorvem os esforços da tração. Impede-se assim que haja a ruptura longitudinal por fendilhamento, que pode chegar à superfície da peça, acrescentando a possibilidade do início da corrosão da barra de aço. A Figura 3.26 mostra o indicado.

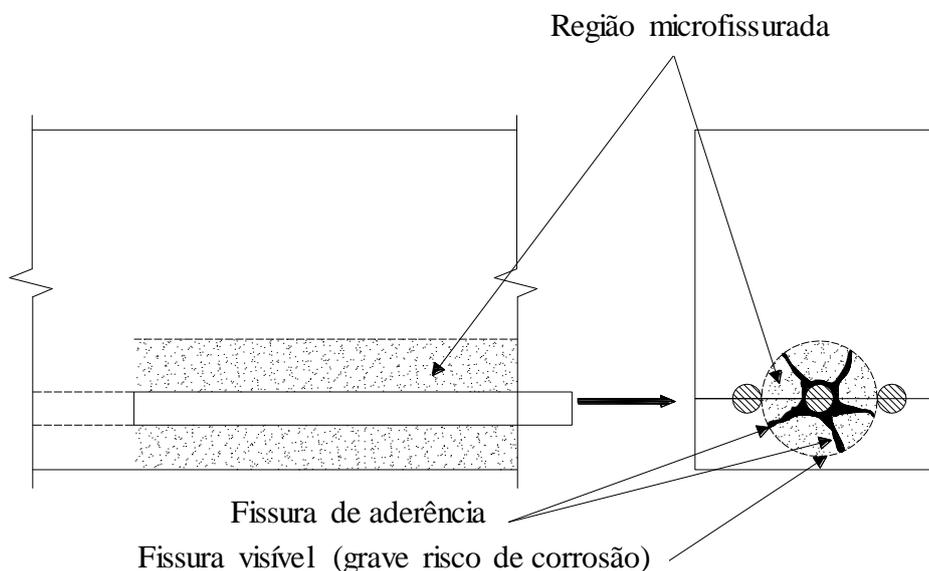


Figura 3.26 – Fendilhamento longitudinal visível (baseado em: FUSCO, 2013)

Em resumo, em função do volume do concreto ao redor da barra de aço e o seu diâmetro, poderá ou não ocorrer fendilhamento, no caso de não serem colocadas armaduras transversais, como é mostrada na Figura 3.27 a seguir.

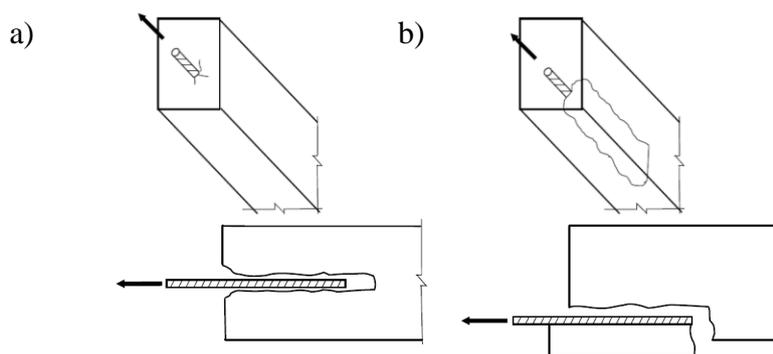


Figura 3.27 – Tipos de falhas em ancoragens retas no concreto sem estribos: a) falha de arrancamento sem fendilhamento e b) fendilhamento no caso de cobertura pequeno com relação ao diâmetro da barra de aço (baseado em: ENGSTRÖM et al., 2011 apud DAHLGREN; SVENSSON, 2013)

3.9 ENSAIO *PULL-OUT* E FENDILHAMENTO

Conforme já explicado, o ensaio *pull-out* é considerado satisfatório quando ocorre o arrancamento da barra do corpo de prova de concreto. Para evitar o fendilhamento, as dimensões do corpo de prova (cúbico) para o ensaio são de 200 mm, como mínimo, ou $10\varnothing$, pelo qual o manuseio é difícil. Por tal motivo muitos estudos buscam estabelecer o valor de confinamento que pode garantir o comportamento de deslizamento da barra, diminuindo o valor $10\varnothing$, obtendo uma relação c/\varnothing ótima para a execução do ensaio de arrancamento.

O trabalho de Torre-Casanova et al. (2013) conclui que a relação c/\varnothing de aproximadamente 4,5 é o limite entre os dois tipos de fenômenos (deslizamento e fendilhamento) para obter a tensão máxima de aderência, conforme gráfico da Figura 3.28.

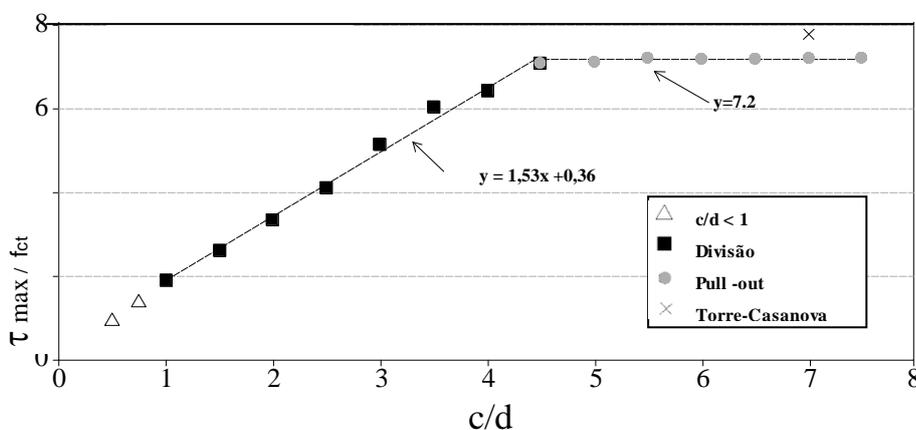


Figura 3.28 – Evolução da tensão máxima de aderência pela relação c/d (baseado em: TORRE-CASANOVA et al., 2013)

No mesmo sentido de investigação, o trabalho de Gavilán et al. (2014) fez-se uma vasta pesquisa sobre publicações no período de 2010 a 2013. Foram analisados 782 resultados de ensaios de arrancamento com a mesma configuração em relação ao comprimento aderente ($5\varnothing$), dados da resistência do concreto e tipos de falhas (deslizamento o fendilhamento). A Tabela 3.4 mostra os resultados principais do trabalho. Observa-se que com uma relação $c/\varnothing = 4,5$ se garante o deslizamento da barra para uma faixa de resistência à compressão do concreto de 20 MPa a 50 MPa.

Tabela 3.4 – Resumo dos valores limite da relação c/\varnothing

Resistência média (MPa)	Deslizamento	Fendilhamento	
	Relação c/\varnothing mín	Relação c/\varnothing máx	Relação c/\varnothing mín
≤ 20	4,5	3,5	3,5
$20 < f_c \leq 30$	4,5	4,2	2,9
$30 < f_c \leq 40$	4,5	4,2	3,5
$40 < f_c \leq 50$	4,5	4,5	2,6
$f_c > 50$	4,5	3,7	3,7

(fonte: GAVILÁN et al., 2014)

A importância do concreto ao redor da barra de aço é indicada no ACI 318S-14, no item 17.7, que também indica a distância entre a barra e a borda de uma esquila de concreto para ancoragens que devem ficar colocados no concreto antes da concretagem, no caso das mesmas não apresentarem armaduras transversais. O valor para evitar o fendilhamento é $4d_a$, onde “ d_a ” é o diâmetro exterior da barra de ancoragem ou chumbador.

A Tabela 3.5, baseada no ACI 318S-14, mostra o cobrimento mínimo para elementos de concreto sem protensão de acordo ao tipo de elemento e a diâmetro da barra.

Tabela 3.5 – Cobrimentos mínimos em concreto sem protensão.
(Baseado no ACI 318S-14)

Exposição do concreto	Elemento	Barra	Cobrimento (mm)
Construído contra o solo e com contacto permanente com solo	Todos	Todas	75
Exposto ao ambiente ou em contacto com solo	Todos	De 19 mm a 57 mm	50
		16 mm. Alambre MW200, MD200 e menores	40
Sem exposição	Lajes, viguetas e muros	43 mm e 57 mm	40
		36 mm e menores	20
	Vigas, colunas, bases e amarres à tração	Barras principais, estrivos, espirais	40

3.10 RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO E ADERÊNCIA

O início dos estudos da aderência de uma barra de aço no concreto, já demonstraram que existiram uma forte correlação entre a resistência à compressão do concreto e a tensão máxima última de aderência, conforme Figura 3.6. Também foram encontradas relações entre a resistência à tração do concreto e a tensão máxima última de aderência.

Segundo o FIB Model Code 2010, para ensaios com carregamentos monotonicamente² crescentes, a tensão de aderência entre o concreto e a barra de aço, no caso com deslizamento *pull-out* ou fendilhamento, pode ser calculada em função do deslocamento relativo de acordo com o gráfico da Figura 3.29 e as Equação 3.3, Equação 3.4, Equação 3.5 e Equação 3.6.

² Ensaios de solicitação monotônica são ensaios normalizados onde a aplicação de cargas nos materiais se dá de forma uniaxial, contínua e crescente até a ruptura, buscando a coleta de dados que caracterizem as propriedades mecânicas dos correspondentes materiais, as quais serão utilizadas para o projeto mecânico.

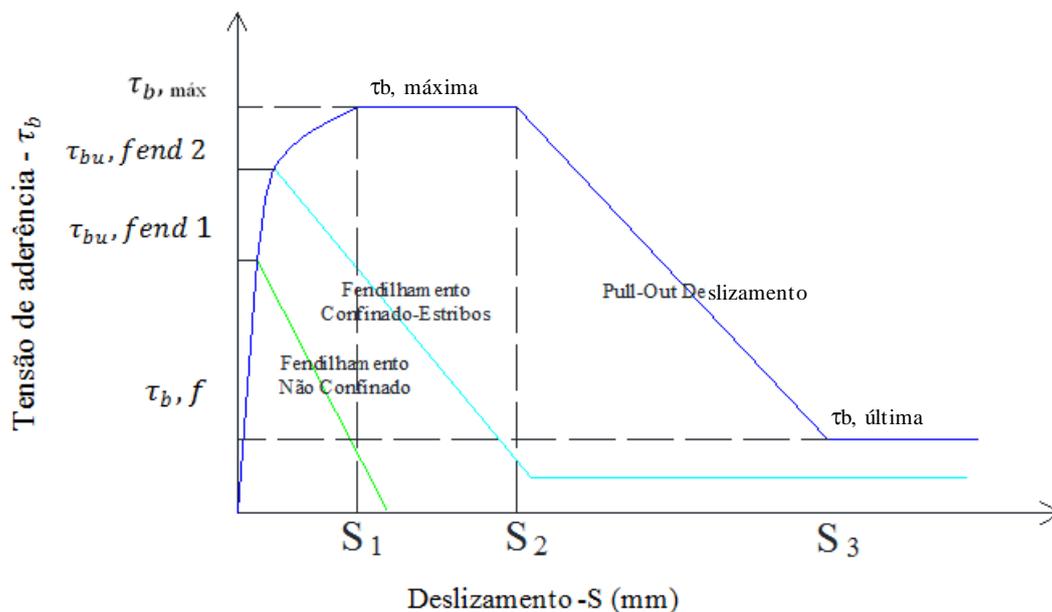


Figura 3.29 –Curva típica de tensão-deslizamento obtida em ensaios monotônicos de aderência (baseado em: FIB Model Code, 2010)

$$\tau_b = \tau_{b,m\acute{a}x} * (S/S_1)^\alpha, \quad \text{para } 0 \leq S \leq S_1 \quad (3.3)$$

$$\tau_b = \tau_{b,m\acute{a}x}, \quad \text{para } S_1 \leq S \leq S_2 \quad (3.4)$$

$$\tau_b = \tau_{b,m\acute{a}x} * (\tau_{b,m\acute{a}x} - \tau_f) * (S - S_2) / (S_3 - S_2), \quad \text{para } S_2 \leq S \leq S_3 \quad (3.5)$$

$$\tau_b = \tau_f, \quad \text{para } S_3 < S \quad (3.6)$$

Onde:

- a) “ τ_b ” é a tensão de aderência, em “MPa”;
- b) “ $\tau_{b,m\acute{a}x}$ ” é a tensão máxima de aderência, em “MPa”;
- c) “S” é o deslizamento, em “mm”;
- d) “ S_1 ” é o deslizamento no estágio 1, em “mm”;
- e) “ S_2 ” é o deslizamento no estágio 2, em “mm”;
- f) “ τ_f ” é a tensão de aderência final, em “MPa”;
- g) “ S_3 ” é o deslizamento no estágio 3, em “mm”.

Dependendo da seleção do coeficiente “ α ” ($0 \leq \alpha \leq 1$) na Equação 3.3, todas as formas de relacionamento tensão aderência-deslizamento habituais podem ser modeladas, a partir de uma aderência com uma tensão constante característica ($\alpha = 0$) até a tensão aderência-deslizamento com o aumento da tensão de aderência linear ($\alpha = 1$).

Dependendo do modo de falha, *pull-out* ou fendilhamento, diferentes parâmetros são aplicados, conforme mostrado na Tabela 3.5. Os valores das colunas 1 e 2, falhas pelo deslizamento, são válidos para concreto confinado, onde o cobrimento da barra é $\geq 5\phi$ e distância entre barras $\geq 10\phi$.

Tabela 3.6 – Considerações e condições de projeto que influenciam na tensão de aderência aço-concreto

	1	2	3	4	5	6
	Deslizamento		Fendilhamento			
	$\varepsilon_s < \varepsilon_{s,y}$		$\varepsilon_s < \varepsilon_{s,y}$			
	Boas condições de aderência	Todas as outras condições de aderência	Boas condições de aderência		Todas as outras condições de aderência	
			Não confinado	Confinado com estribos	Não confinado	Confinado com estribos
$\tau_{b,máx}$	$2.5 \sqrt{f_{ck}}$	$1,25 \sqrt{f_{ck}}$	$7.0 \sqrt[4]{0,05 f_{ck}}$	$8.0 \sqrt[4]{0,05 f_{ck}}$	$5.0 \sqrt[4]{0,05 f_{ck}}$	$5,5 \sqrt[4]{0,05 f_{ck}}$
S_1	1,0 mm	1,8mm	$S(\tau_{b,máx})$	$S(\tau_{b,máx})$	$S(\tau_{b,máx})$	$S(\tau_{b,máx})$
S_2	2,0 mm	3,6mm	S_1	S_1	S_1	S_1
S_3	S_{clear}	S_{clear}	$1,2 S_1$	$0,5 S_{clear}^*$	$1,2 S_1$	$0,5 S_{clear}^*$
α	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$\tau_{b,f}$	$0,4 \tau_{b,máx}$	$0,4 \tau_{b,máx}$	0	$0,4 \tau_{b,máx}$	0	$0,4 \tau_{b,máx}$

(fonte: FIB Model Code, 2010)

3.11 PROJETO APULOT

O Projeto APULOT (*Appropriate Pull-Out Test*) foi desenvolvido sobre uma idéia original de Lorrain e Barbosa (2008), que mostraram em um artigo como os ensaios da aderência aço-concreto podem ajudar como uma nova ferramenta para o controle de qualidade do concreto armado, baseados na forte correlação entre a resistência de compressão “ f_c ” e a tensão máxima de aderência “ $\tau_{b,máx}$ ”.

A recomendação da RILEM/CEB/FIP RC6:1983 foi a sustentação do novo ensaio, e os autores propuseram inicialmente a utilização de garrafas de plástico PET cilíndricas como molde para os corpos de prova, as quais deveriam possuir um diâmetro mínimo de 80 mm para evitar o fendilhamento. A garrafa PET não era retirada durante a realização do ensaio e os corpos de prova possuíam duas regiões não aderentes nas extremidades do corpo de prova, como ilustra a Figura 3.30.

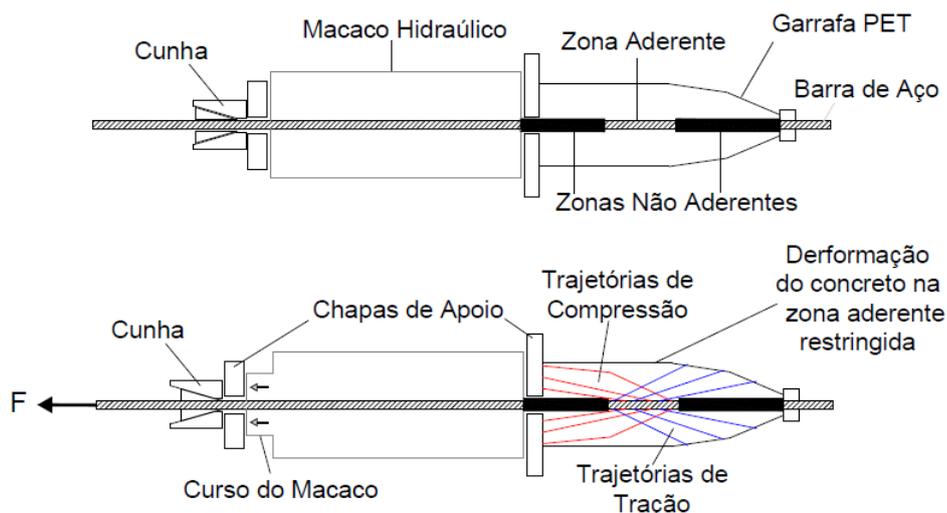


Figura 3.30 – Desenho esquemático do método APULOT (SILVA, 2010)

Com resultados de vários ensaios do tipo *POT* padronizado pela RILEM e APULOT, que apresentaram deslizamento da barra de aço em relação ao concreto, os autores Lorrain e Barbosa (2008) e Lorrain et al. (2011) obtiveram a curva do gráfico da Figura 3.31.

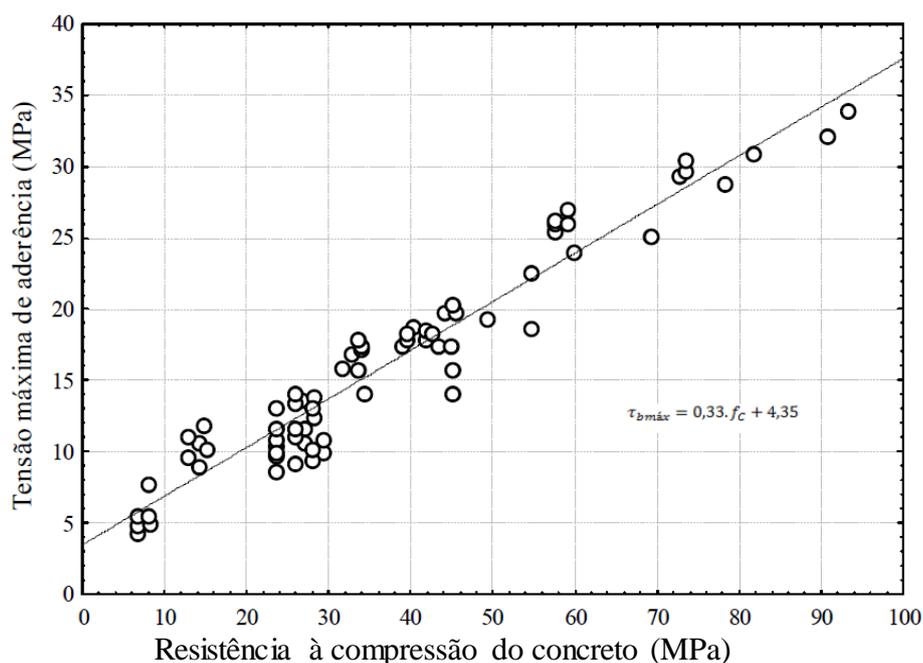


Figura 3.31 – Gráfico da curva de correlação entre a tensão máxima de aderência e a resistência à compressão (baseado em: LORRAIN; BARBOSA, 2008 apud LORRAIN et al., 2011)

O objetivo da implementação do ensaio APULOT em canteiros de obras é averiguar a conformidade da resistência à compressão do concreto, para o qual os autores propõem a seguinte metodologia:

- a) fazer ensaios APULOT em canteiros de obras;
- b) determinar o valor da tensão máxima de aderência “ $\tau_{b,máx}$ ”;
- c) a partir do valor da tensão máxima de aderência “ $\tau_{b,máx}$ ” e mediante as curvas de correlação pré-estabelecidas, conforme a última figura, determinar a resistência de compressão “ f_c ”.

A seguir são apresentadas figuras ilustrativas do processo do ensaio APULOT obtidas de alguns trabalhos. Nelas são mostradas a preparação das garrafas PET, a colocação de separadores não aderentes na barra de aço e a concretagem, conforme Figura 3.32, a cura dos corpos de prova, segundo a Figura 3.33, o ensaio de arrancamento, conforme Figura 3.34 e os tipos de ruptura, segundo Figura 3.35.



Figura 3.32 – (a) Colocação de separadores plásticos nas barras de aço (b) Garrafa PET. (c) Concretagem (FRUTOS, LOVERA; 2013)



Figura 3.33 – (a) Cura dos corpos de prova. (b) Vista das mostras antes do ensaio APULOT (FRUTOS, LOVERA; 2013)



Figura 3.34 – (a) Ensaio APULOT. (b) Vista superior. (CANDIA; LARÁN, 2014)



Figura 3.35 – Rupturas por deslizamento de barra de 8 mm, à esquerda, e fendilhamento para barra de 10 mm, à direita, com o mesmo concreto (CANDIA; LARÁN, 2014)

3.12 AVANÇO DAS PEQUISAS APULOT

O Grupo de Pesquisa APULOT foi criado com certificação da CNPq e da UNESP e esteve em vigor até o ano 2014. Diversos aspectos do APULOT foram estudados e aprimorados pelos integrantes do grupo de pesquisa. Este grupo de pesquisa foi liderado pela Profa. Mônica P. Barbosa (UNESP/Ilha Solteira) e pelo Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS/LEME) contando com a participação de outras universidades brasileiras (PUC-Campinas, UFRJ, IME, UFF, UNICAMP, UERJ, UFJF e o CEFET-MG), ligado a uma rede internacional integrada por laboratórios de pesquisa (INSAT-França, ENIG-Tunísia, UPV-Espanha e FIUNA-Paraguai). No Paraguai o Grupo foi liderado pelo Prof. Sergio Gavilán da FIUNA. De acordo com Silva (2014), o grupo de pesquisa tentou determinar a influência de diversas variáveis na resposta do ensaio de aderência, visando consolidar um método de ensaio. Entre os trabalhos desenvolvidos por seus componentes, destacam-se:

- a) Barbosa et al. (2011), que avaliaram a influência da corrosão superficial na aderência com o método APULOT;
- b) Lorrain et al. (2010) e Silva Filho et al. (2012), que compararam diferentes configurações geométricas de barras de aço na resposta do ensaio APULOT;
- c) Vale Silva et al. (2011) e Makni et al. (2010), que avaliaram o efeito de variação do cobrimento do concreto ao redor da barra de aço;
- d) Vale Silva et al. (2013), que analisaram os resultados de ensaios de aderência através da utilização de redes neurais artificiais;

- e) Ferreira et al. (2011), Barbosa et al. (2013), Gaspareto et al. (2013) e García-Taengua et al. (2014), que avaliaram os limites da resistência mecânica do concreto nos ensaios de aderência APULOT para aplicação em canteiro de obra;
- f) Dal Bosco et al. (2012), que fizeram uma análise do procedimento de retirada da barra do concreto (*pull-out* ou *push-in*);
- g) Calderaro et al. (2012), que avaliaram a influência da geometria dos moldes no ensaio de aderência;
- h) Godoy et al. (2012), que analisaram a influência de agregados leves de resíduos de pneus na aderência aço-concreto com o método APULOT;
- i) Nguyen et al. (2011), que avaliaram a configuração da emissão acústica nos ensaios de aderência com o método APULOT.

Com o desenvolvimento da presente pesquisa, busca determinar-se:

- a) o valor de cobrimento do concreto ao redor da barra, que possa evitar o fendilhamento do concreto;
- b) o tipo de molde mais adequado para garantir uma uniformidade aceitável dos resultados dos ensaios, para o qual se propõe o desenvolvimento e fabricação de um molde específico para o APULOT, que proporcione rapidez e facilidade no processo de moldagem e desmoldagem;
- c) a influência do processo da cura e das condições ambientais, como vento e temperatura nos resultados da tensão máxima de aderência;
- d) como a medição da maturidade do concreto pode auxiliar para determinar quando é o momento certo para fazer o ensaio de arrancamento;
- f) aprimorar a curva de correlação entre a tensão máxima de aderência e a resistência do concreto, para uma faixa usual da resistência em estruturas de concreto armado e protendido;
- g) avaliar aspectos técnicos e práticos para uma adequada implementação do ensaio APULOT em canteiros de obras.

Com relação à implementação de ensaio APULOT nos canteiros de obras, Silva (2014) indica que ele deve ser de fácil execução, principalmente com a simplificação da preparação para o ensaio e que deve atender alguns pré-requisitos, como são ilustrados na Figura 3.36.

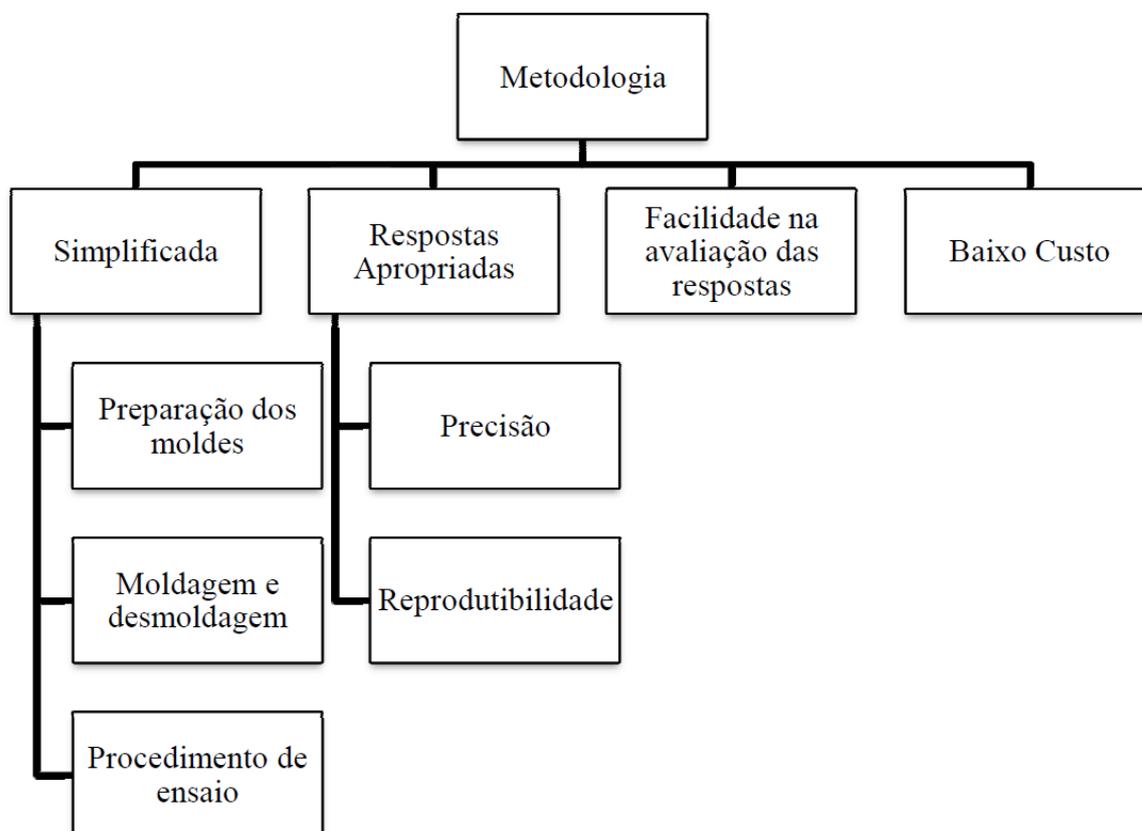


Figura 3.36 – Pré-requisitos requeridos para implementação do ensaio como método de controle da qualidade do concreto (SILVA, 2014)

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, descrevem-se todos os trabalhos de campo desenvolvidos, desde o planejamento, a preparação do experimento, o equipamento e os instrumentos empregados para fazer os ensaios e medições até os procedimentos para sua realização.

4.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

Este trabalho foi realizado em três etapas experimentais.

A Etapa 1 foi realizada no laboratório do LEME, na cidade de Porto Alegre, Brasil, no período compreendido entre junho e dezembro de 2013. Os trabalhos consistiram em ensaios de arrancamento em laboratório empregando diferentes tamanhos e configurações de corpos-de-prova. Isto foi realizado para definir as dimensões ótimas dos corpos de prova para os ensaios de arrancamento.

A Etapa 2 desenvolveu-se entre os meses de março e dezembro de 2014, no prédio do Gavilán & Asociados, localizado na cidade de Fernando de la Mora, Paraguai. Nesta etapa realizaram-se ensaios de arrancamento em corpos de prova com as dimensões adotadas na primeira etapa e ensaios de arrancamento em escala real, em painéis de concreto. Também se realizaram ensaios à compressão simples em corpos de prova moldados e em testemunhos extraídos dos painéis, para estabelecer uma relação entre os valores de resistência à compressão simples e de tensão última aderência.

Foram feitas ainda medidas de maturidade dos concretos empregados nos painéis para estabelecer o valor mínimo da maturidade do concreto mínima para iniciar os ensaios de arrancamento.

Na Etapa 3, realizada de abril de 2016 a Julho de 2017, foi desenvolvido dois tipos de trabalhos. Por uma parte, implementaram-se ensaios de arrancamento tanto em corpos de prova como em elementos estruturais de obras em execução situadas na cidade de Assunção, Paraguai. Os resultados de tensão última de aderência foram comparados com os valores de resistência à compressão simples obtidas dos ensaios de corpos de prova moldados no

canteiro de obras. Com isto será possível verificar a factibilidade de emprego dos ensaios de arrancamento em canteiros de obra para estimar a resistência à compressão simples do concreto nas primeiras idades.

Também nesta etapa realizaram-se medidas de maturidade e ensaios de arrancamento em elementos estruturais (painéis) similares aos construídos na Etapa 2 e em corpos de prova para analisar a influência da temperatura e o tipo de cura na maturidade do concreto e na relação com a tensão última de aderência.

4.3 ETAPA 1: ENSAIOS DE LABORATÓRIO

4.3.1 Descrição dos Trabalhos

Na Etapa 1 buscou-se determinar a forma e as dimensões ótimas dos corpos de prova empregados para fazer os ensaios de arrancamento. O parâmetro principal foi a relação entre o diâmetro da barra de aço empregada e a espessura do revestimento de concreto da mesma. O diâmetro da barra foi mantido constante e igual à 8 mm. Assim, cada dimensão de corpo de prova representa uma relação revestimento/diâmetro (c/\varnothing) diferente. Em todos os casos o comprimento aderente foi mantido constante, igual à 4cm, e também sua posição com respeito ao topo do corpo de prova. Finalmente o corpo de prova adotado foi aquele com a mínima dimensão que não apresentou fendilhamento no momento do ensaio de arrancamento.

Nesta etapa foram desenvolvidos três concretagens onde foram moldados corpos de prova cilíndricos (CPs) de 10 cm x 20 cm, corpos de prova APULOT de 8,5 cm x 10 cm e corpos de prova prismáticos de dimensões variáveis entre 8 cm x 8 cm x 10 cm, 8,5 cm x 8,5 cm x 10 cm, 12,5 cm x 12,5 cm x 10 cm, 16 cm x 16 cm x 10 cm e cúbicos de 10 cm e 20 cm de aresta.

Os corpos de prova APULOT foram moldados conforme o explicado no item 3.10 do Capítulo 3, no molde PET com um comprimento aderente de 4 cm o que equivale a 5 vezes o diâmetro da barra de acordo com as especificações da CSN EN 10080:2005.

O esquema pode observar-se na seguinte Figura 4.1.

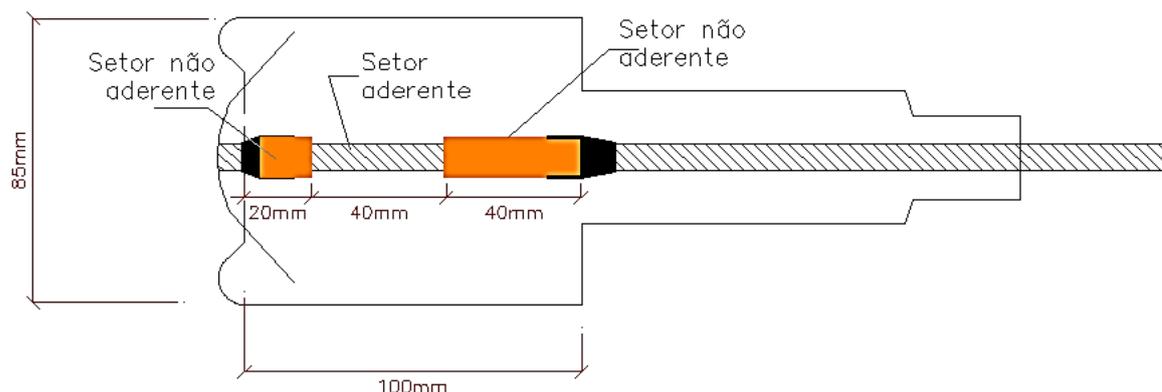


Figura 4.1 – Esquemas dos corpos de prova APULOT

Os corpos de prova prismáticos de 8,5 cm de aresta na base foram elaborados em moldes metálicos desenhados e construídos para tal fim, que reproduzem a configuração de seções aderentes e não aderentes das barras dos corpos de prova APULOT. As seções não aderentes foram definidas por tubos de PVC fixados às barras com fita plástica. O comprimento aderente foi de 40 mm e a barra de aço de 8 mm de diâmetro, para todos os corpos de prova. A Figura 4.2 mostra uma seção esquemática dos moldes desenhados e uma vista isométrica de um corpo de prova terminado.

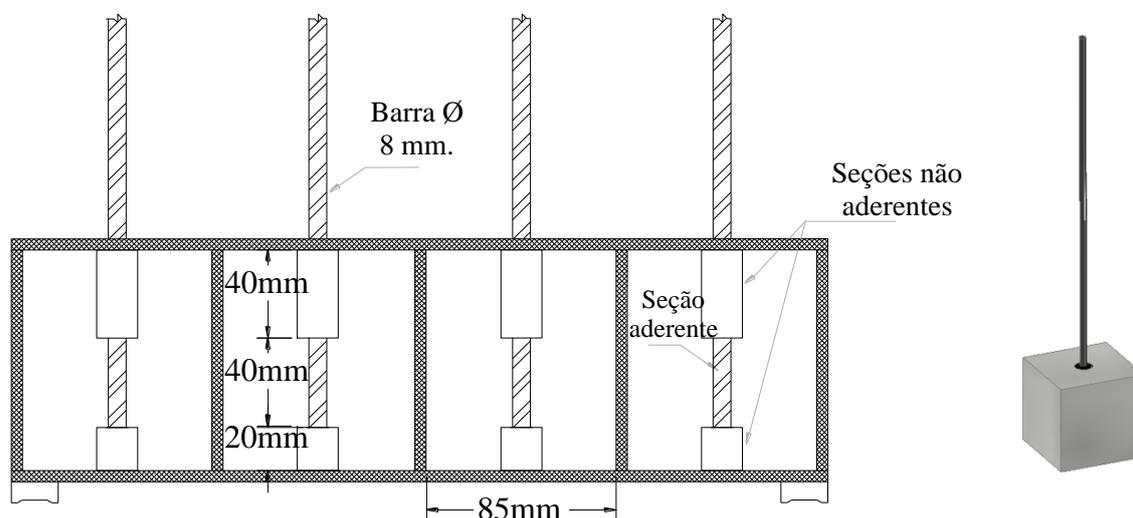


Figura 4.2 – Seção de uma fôrma para moldagem e vista de um corpo de prova prismático

Os corpos de prova cúbicos prismáticos de 8,5 cm e os de 12,5 cm, 16,0 cm e 20,0 cm foram feitos em moldes cúbicos de madeira. As barras de aço são colocadas através de um furo feito numa das faces laterais. Também neste caso as seções não aderentes são definidas com tubos de PVC, fixados às barras com fita plástica autoadesiva.

Os corpos de prova cilíndricos foram testados à compressão simples para obter a resistência do concreto, os corpos de prova APULOT e os prismáticos foram ensaiados ao arrancamento, como foi explicado no capítulo anterior, para obter a tensão última de aderência aço-concreto. As diversas dimensões dos cubos representam diferentes espessuras de cobrimento da barra de aço e sua influência na tensão de aderência e na possibilidade de fendilhamento do corpo de prova.

4.3.2 Quantidade de Ensaio

A seguir listam-se os trabalhos feitos em cada evento:

Tabela 4.1 – Detalhe de concretagens e elementos moldados

Concretagem 1			Concretagem 2			Concretagem 3		
Nº	Tipo	Dimensão [cm]	Nº	Tipo	Dimensão [cm]	Nº	Tipo	Dimensão [cm]
26	APULOT	8,5 x 10	26	APULOT	8,5 x 10	48	APULOT	8,5 x 10
8	PRISMATI COS	8 x 8 x 10	14	PROSMATI COS	8 x 8 x 10	10	PRISMATI COS	8 x 8 x 10
12	CPs	10 x 20	9		10 x 10 x 10	12		8,5 x 8,5 x 10
			14		12,5 x 12,5 x 10	9		10 x 10 x 10
			12		16 x 16 x 10	15		12,5 x 12,5 x 10
			12		20 x 20 x 20	9		16 x 16 x 10
			12	CPs	10 x 20	9		20 x 20 x 20
46	TOTALES		99	TOTALES		21	CPs	10 x 20
						133	TOTALES	

4.3.3 Execução do Experimento

Em todos os eventos, os concretos empregados foram elaborados em uma betoneira de eixo vertical, no laboratório, dosados para 1 m³ de concreto, cujas características de cada concretagem são apresentadas na Tabela 4.2. Com os dosagens foi buscado atingir uma faixa de resistência à compressão.

Tabela 4.2 – Dosagens empregados nos concretagens

Item	Unidade	Quantidades		
		Concretagem 1	Concretagem 2	Concretagem 3
Propriedade				
Abatimento	cm	6	21,5	19
Relação a/c	-	0,6	0,7	0,6
Material				
Cimento	kg	26,5	42	53,7
Areia	kg	72,9	115	147,5
Brita	kg	99,4	157	201
Água	lt	15,9	28,2	32,2

Em cada concretagem foram controlados o abatimento no cone de Abrams, conforme Figura 4.3, a temperatura do concreto e a temperatura ambiente. Os corpos de prova (CPs) foram desmoldados após 24 h e colocados nos setores de armazenagem até sua idade de ensaio. As Figuras 4.3 à 4.8 mostram os trabalhos desenvolvidos, em que a Figura 4.4 apresenta os CPs APULOT e CAPULOT moldados na Concretagem 1, a Figura 4.5, os CPs CAPULOT moldados na Concretagem 2, a Figura 4.6, os CPs moldados na Concretagem 3, a Figura 4.7, a desmoldagem dos CPs APULOT, e a Figura 4.8, a armazenagem dos CPs APULOT e CAPULOT.



Figura 4.3 – Corpos de prova APULOT e CAPULOT moldados na Concretagem 1



Figura 4.4 – Corpos de prova CAPULOT com várias dimensões moldados na Concretagem 2

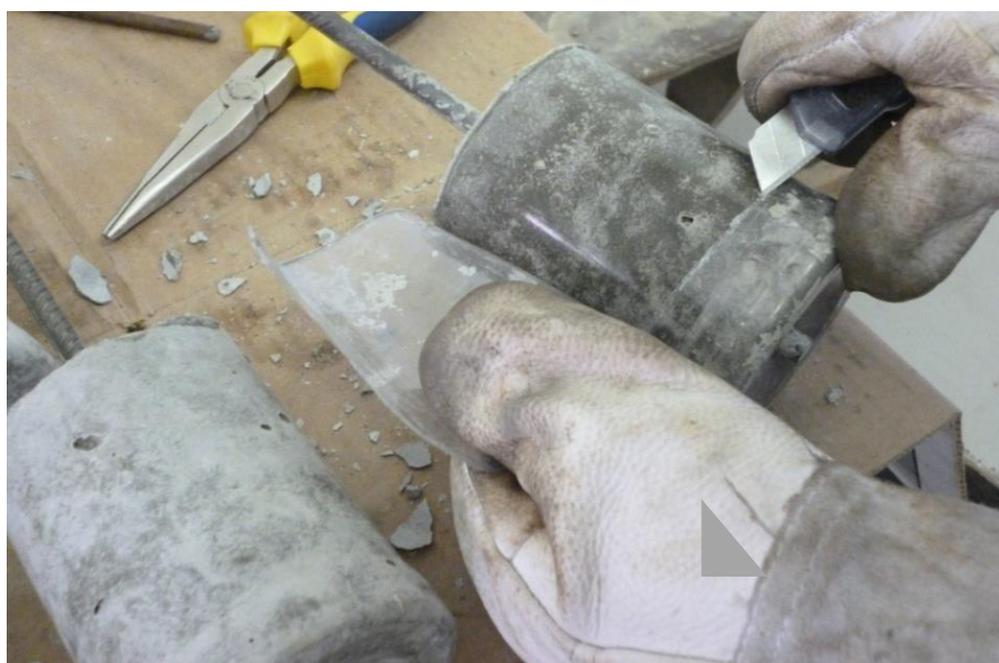


Figura 4.5 – Desmoldagem de corpos de prova APULOT e retirada do PET



Figura 4.6 – Armazenamento de corpos de prova CAPULOT e APULOT

4.3.4 Equipamentos de Ensaio

Os ensaios de compressão simples de cada corpo de prova (CP) foram realizados com uma prensa hidráulica, mostrada na Figura 4.9, servo controlada (marca SHIMADZU, modelo UH-I) de 2.000 kN de capacidade. Os valores de força são observados em tempo real mediante o data logger e uma PC.



Figura 4.7 – Ensaio à compressão simples de um CP

Os ensaios de arrancamento realizaram-se mediante um conjunto hidráulico composto por uma bomba hidráulica automática e um cilindro de haste vazada de 120 kN de capacidade. Para realizar o ensaio, o cilindro hidráulico, fornecido por um sistema de cunha tripartida no seu extremo superior, localiza-se em forma concêntrica à barra de aço do APULOT e dos corpos de prova cúbicos (a barra coloca-se dentro da haste vazada do cilindro). Emprega-se um suporte de aço onde se apoia o corpo-de prova como mostra a Figura 4.8.

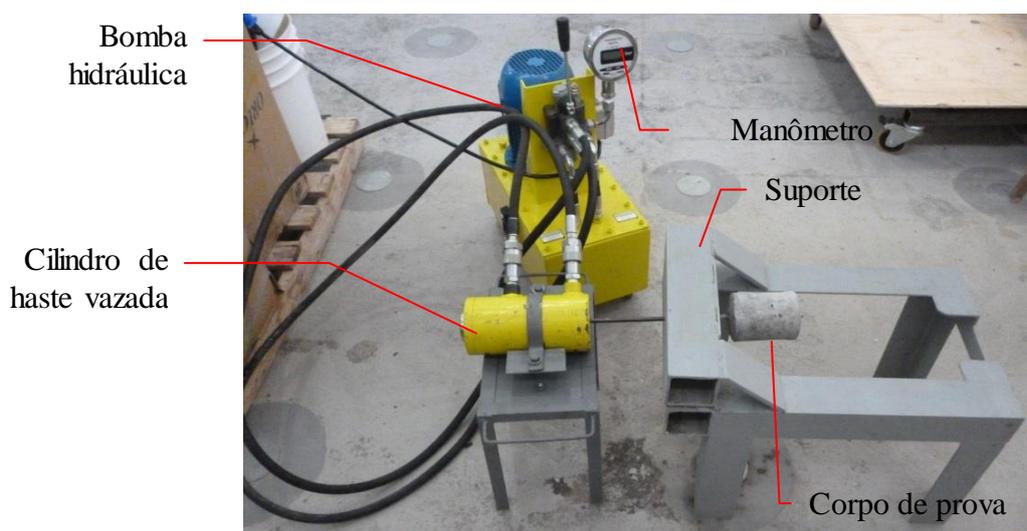


Figura 4.8 – Conjunto hidráulico para ensaios de arrancamento

A cunha trava-se sobre a barra e acciona-se a bomba. O conjunto contém uma chave que permite regular a velocidade da aplicação da tração na barra.

As medidas obtêm-se em Bar mediante o manômetro incorporado ao conjunto. Cada medida corresponde à pressão máxima aplicada à barra para o arrancamento da mesma. Realizou-se a calibração deste equipamento com a prensa hidráulica a fim de obter a expressão que relaciona os valores de pressão aplicada (medidos no manômetro) e a força correspondente (medida na prensa hidráulica). A Figura 4.9 e a Figura 4.10 correspondem, respectivamente, à calibração do conjunto por técnico do LEME e vistas do manômetro e gráfico da leitura da carga na prensa hidráulica.



Figura 4.9 – Calibração do conjunto hidráulico

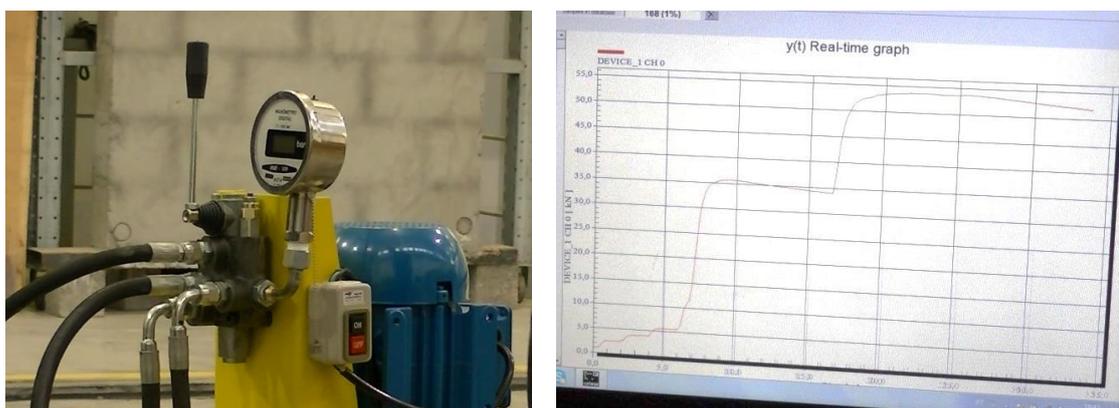


Figura 4.10 – Vista do manômetro e leitura da carga na prensa hidráulica

A Figura 4.11 apresenta o gráfico com a expressão de correlação obtida entre as leituras do manômetro da bomba e da carga na prensa. Em sequência, são apresentadas as Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14 dos ensaios de CPs, respectivamente, APULOT, prismáticos e cúbicos.

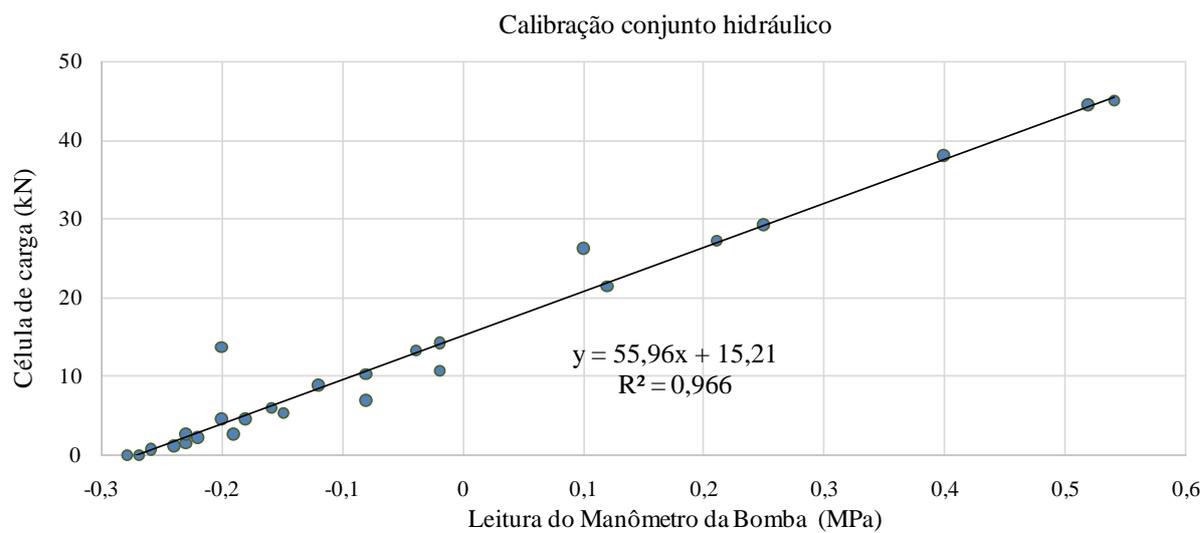


Figura 4.11 – Gráfico de correlação entre leitura do manômetro e leitura da prensa

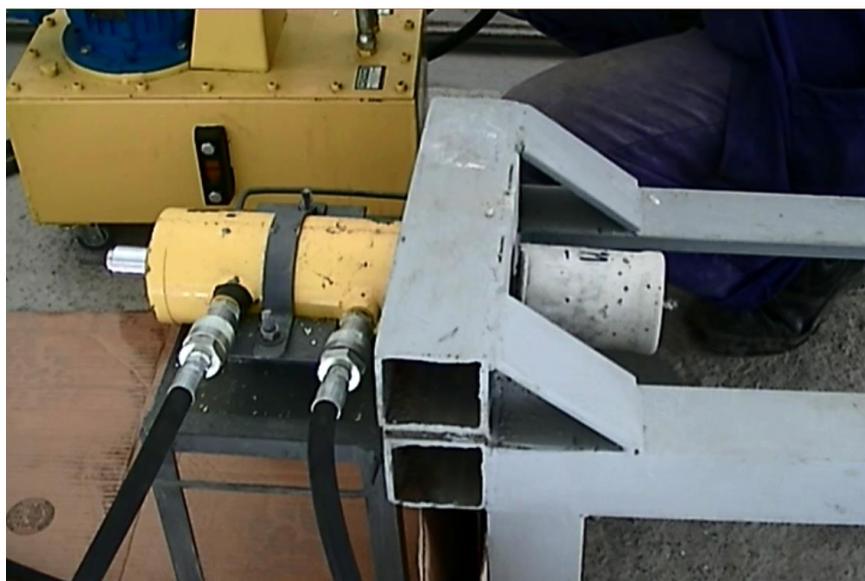


Figura 4.12 – Ensaio de um corpo de prova APULOT



Figura 4.13 – Ensaio de um corpo de prova prismático de 8,5 cm x 8,5 cm x 10,0 cm



Figura 4.14 – Ensaio de um corpo de prova prismático de 12,5 cm x 12,5 cm x 10 cm

Após cada ensaio de APULOT e CAPULOT os corpos de prova foram observados para definir o tipo de falha: fendilhamento, como ilustrado na Figura 4.15, ou deslizamento. Com isso, pode definir-se a relação ótima entre cobrimento e diâmetro dos corpos-de-prova.



Figura 4.15 – Fendilhamento em dois corpos de prova APULOT

4.4 ETAPA 2: ENSAIOS EM ESCALA REAL

A seguir descrevem-se os trabalhos desenvolvidos nesta etapa.

4.4.1 Definição das Categorias de Resistência

Empregaram-se concretos elaborados em caminhão-betoneira de f_{ck} compreendidas entre 20MPa e 40 MPa, distribuídos em seis eventos de concretagem, listadas na Tabela 4.3.

Em todas as dosagens foram empregados Cimento Portland CII F40, brita de tipo basáltico e aditivo fluidificante universal.

Tabela 4.3 – Dosagens empregados nos concretagens

Concretagem	f_{ck} (MPa)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (l)	Relação A/C	Aditivo (l)
C1	40	380	830	1190	185	0.49	1.5
C2	40	380	830	1190	185	0.49	1.5
C3	35	350	815	1250	185	0.53	1.5
C4	35	350	815	1250	185	0.53	1.5
C5	20	325	800	1275	180	0.55	1.0
C6	20	325	800	1275	180	0.55	1.0

4.4.2 Definição dos Ensaios

Foram realizados ensaios à compressão simples e ensaios de arrancamento. Para isso foram previstos a moldagem de 4 painéis de concreto para a cada evento, de dimensões média 1,0 m x 2,0 m em planta e 0,2 m de espessura.

Todos os painéis foram moldados sobre plataformas compostas por placas e perfis de aço apoiadas sobre blocos de concreto. Sobre esta plataforma, cujo nível superior estava localizado a uma altura de 1,2 m do solo, construíram-se as fôrmas, com placas de madeira. A Figura 4.16 mostra uma vista esquemática de um dos painéis terminados.

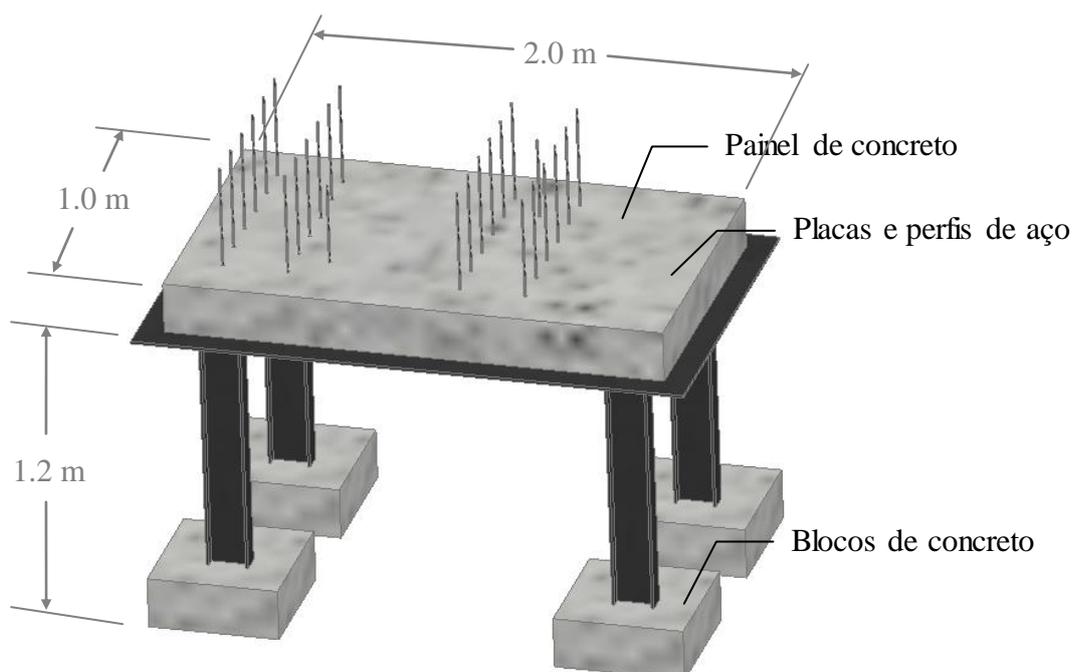


Figura 4.16 – Vista esquemática de painel para ensaios. Dimensões em “m”

Em cada painel, dispuseram-se áreas para a extração de testemunhos para os ensaios à compressão simples e outras áreas para ensaios de arrancamento, denominados *Steel Bar Appropriate Pull-Out Test* (SBPULOT) neste trabalho. Os testemunhos extraídos são de 10 cm de diâmetro nominal, e 20 cm de altura, separadas um mínimo de 10 cm entre as bordas das extrações e entre estes e as bordas do painel.

A seguir mostra-se um esquema da disposição para a extração de testemunhos nos painéis, conforme Figura 4.17.

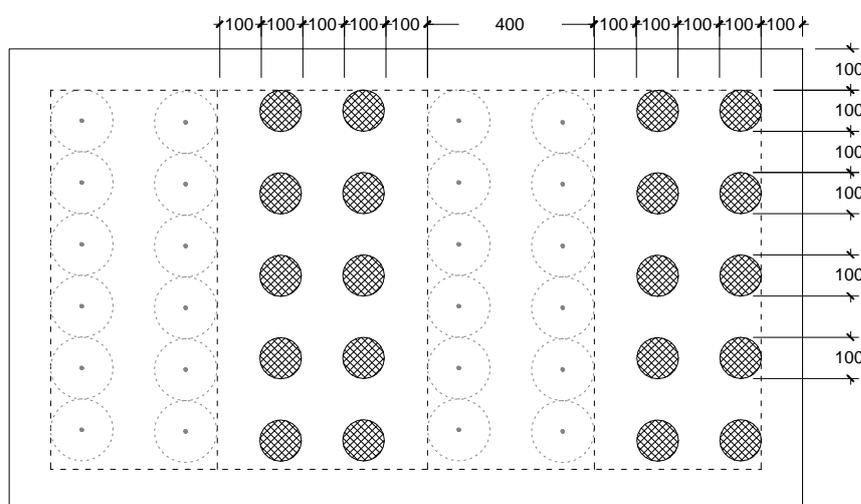


Figura 4.17 – Vista esquemática da localização de testemunhos.
Dimensões em “mm”

Quanto aos ensaios SBPULOT, as barras de aço foram colocadas com uma separação mínima de 15 cm entre elas e a uma distância de 8 cm das bordas do painel. A sua disposição dentro dos painéis e o esquema utilizado mostram-se, respectivamente, na Figura 4.18 e Figura 4.19. As seções não aderentes das barras de aço foram isoladas com tubos de PVC fixados às barras com fita plástica, o comprimento aderente foi de 40 mm, e a barra utilizada foi de 8 mm de diâmetro.

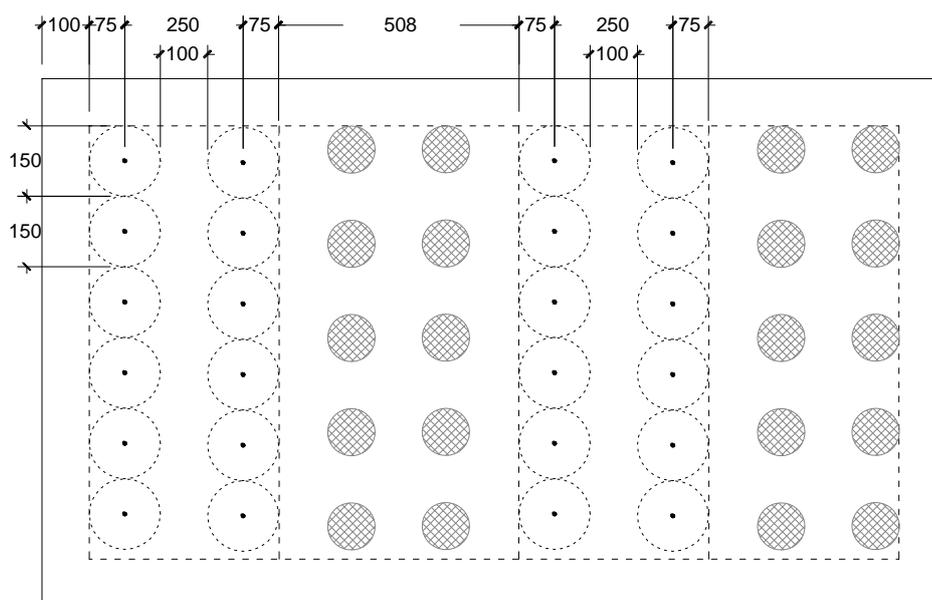


Figura 4.18 – Localização das áreas para ensaios SBPULOT. Dimensões em “mm”

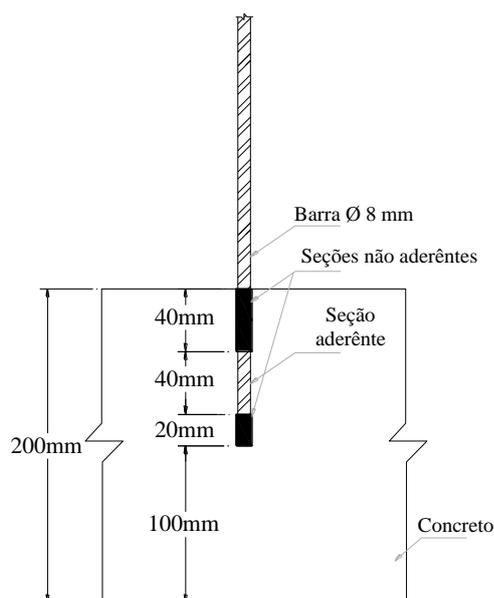


Figura 4.19 – Esquema para o ensaio SBPULOT

Em cada painel foram instalados também dois sensores termopares, a uma distância de 10 cm desde o topo para registrar as temperaturas internas do concreto num tempo determinado, isto é, a efeitos de obter os valores de maturidade do concreto no momento de realizar os ensaios. A seguinte Figura 4.20 mostra um painel típico com a localização dos setores de ensaios.

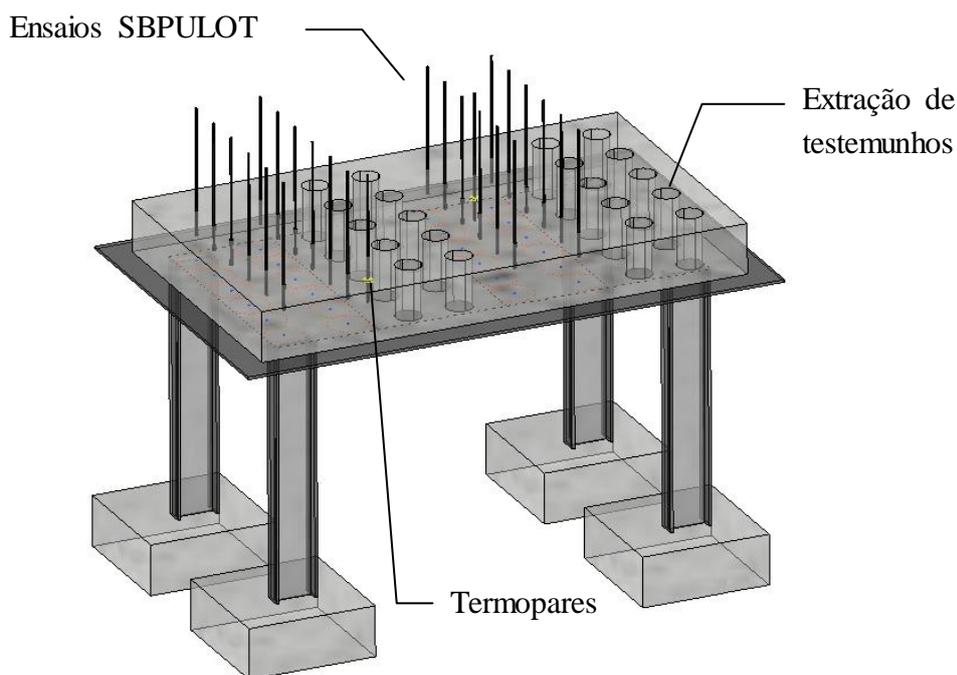


Figura 4.20 – Vista esquemática dos setores de ensaios em um painel.

Com o mesmo concreto utilizado nos painéis, realizou-se a preparação de corpos de prova cilíndricos (CPs) de 10 cm x 20 cm e corpos de prova cúbicos denominados CAPULOT (*Cube Appropriate Pull-Out Test*), de 10 cm x 10 cm x 10 cm, para realizar ensaios à compressão simples e de arrancamento, respectivamente. Os corpos de prova cúbicos CAPULOT, foram elaborados em moldes metálicos desenhados e construídos para tal fim, que reproduzem a configuração de seções aderentes e não aderentes das barras para os ensaios SBPULOT. Os setores não aderentes das barras foram gerados com tubos tronco-cônicos de aço. A Figura 4.21 mostra uma seção esquemática dos moldes desenhados e uma vista isométrica de um corpo de prova terminado.

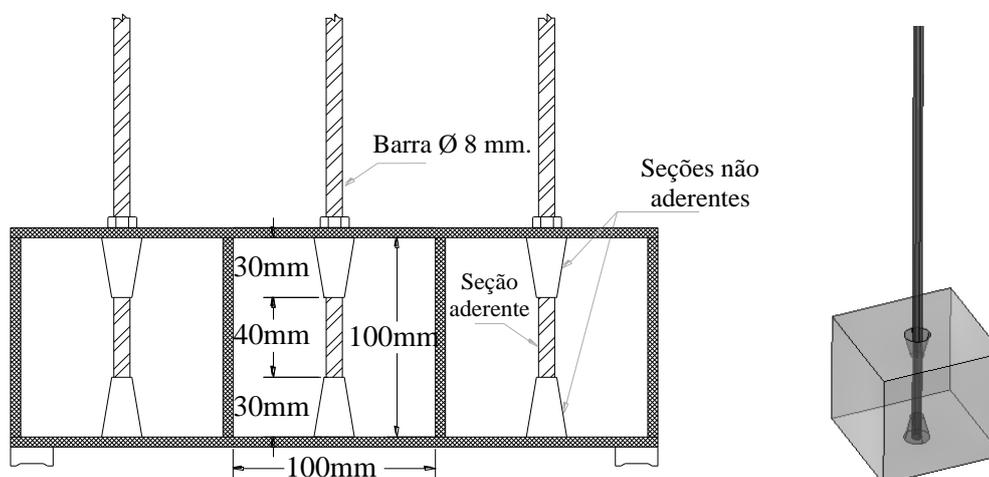


Figura 4.21 – Seção de uma forma para moldagem e vista de um corpo de prova CAPULOT

4.4.3 Definições dos Tipos de Cura

Estabeleceram-se duas condições de cura para os corpos de prova, tanto os CPs como os CAPULOT:

- a) cura úmida (CU), em que metade de cada um dos dois tipos de corpos de prova ficaram submersos em tanque de água a 25 °C a partir das 18 h de sua elaboração e até 6 h antes de serem ensaiados, em cuja codificação foi incluída a nomenclatura CU;
- b) cura no ambiente (CA), em que metade de cada um desses dois tipos de corpos de prova permaneceram sem molhagem, no interior do laboratório até o momento do ensaio. Isso é considerando a situação de CPs sem cura (mantidos no canteiro de obra). Foi escolhido o laboratório devido a sua localização próxima ao site da concretagem. Na codificação foi incluída a nomenclatura CA.

Os painéis também foram submetidos a dois condições de cura similares: à cura úmida (CU), isto é, mantendo uma espessura constante de água sobre a superfície do painel, e à cura por aspersão de água (CA), procedimento empregado habitualmente na obra, consistente em irrigação superficial de acordo ao esquema da Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Etapas de cura tipo CA

Dia 1	10:30	Início concretagem
	12:00	Fim concretagem
	14:00	Umidecimento cada 2 h
	16:00	
	18:00	
Dia 2	8:00	Sem umidecimento
	10:00	
	12:00	
	14:00	
	16:00	
18:00		
Dia 3	8:00	Sem umidecimento
	10:00	
	12:00	
	14:00	
	16:00	
	18:00	

Os painéis foram construídos num espaço aberto, sem cobertura, portanto todo o tempo mantiveram-se expostos à intempérie. O setor destinado à construção dos painéis tem uma extensão de 17,0 m de comprimento por 9,0 m de largura e está rodeado por alvenarias de 4,0 m de altura média, pertencentes a construções vizinhas. A seguir mostram-se o esquema e a vista desse lugar, conforme, respectivamente, às Figuras 4.22 e Figuras 4.23.

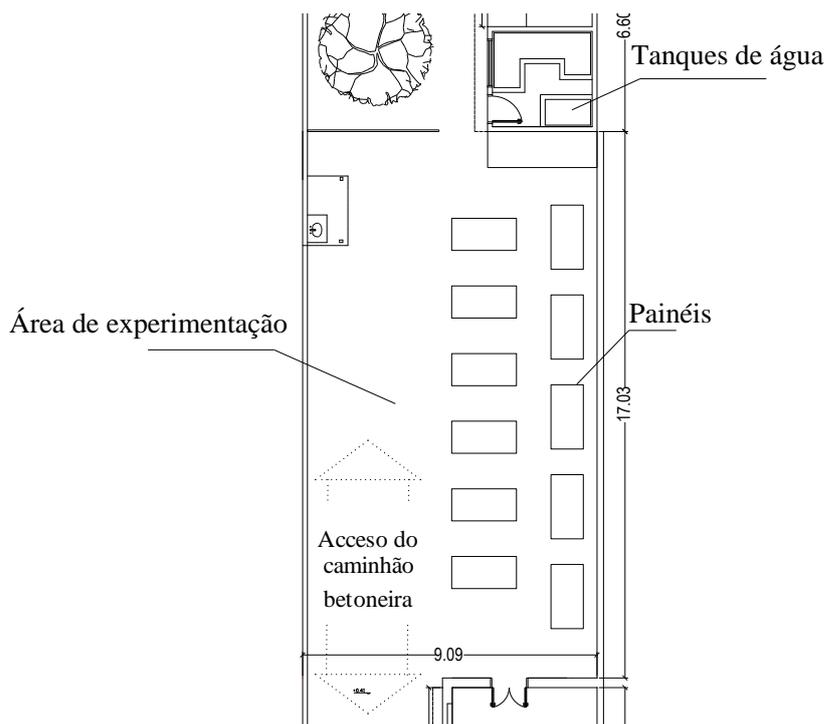


Figura 4.22 – Esquema do campo de experimentação onde foram construídos os painéis



Figura 4.23 – Vista geral do campo de experimentação

4.4.4 Quantidade de Ensaios e Medições

Os ensaios realizaram-se em um total de seis eventos, cada um definido pelo valor de resistência do concreto empregado. Esses ensaios realizaram-se às idades de 3, 5, 7 e 28 dias em cada um dos seis eventos. Às primeiras idades, ou melhor, aos 3, 5 e 7 dias, realizaram-se as maiores quantidades de ensaios, em coincidência com o objetivo da tese, como se indica a seguir:

- a) ensaios em CPs cilíndricos de 10 cm x 20 cm,
 - 12 CPs CA à compressão simples;
 - 12 CPs CU à compressão simples;
- b) ensaios CAPULOT em corpos de prova cúbicos de 10 cm de aresta,
 - 12 CAPULOT CA;
 - 12 CAPULOT CU;
- c) ensaios em painéis,
 - 24 extrações e ensaios de compressão simples de testemunhos CA;
 - 24 extrações e ensaios de compressão simples de testemunhos CU;
 - 24 SBPULOT CA;
 - 24 SBPULOT CU;
 - 8 de maturidade CA.
 - 8 de maturidade CU.

Aos 28 dias, realizaram-se ensaios complementares, como se resume a seguir:

- a) ensaios em CPs cilíndricos de 10 cm x 20 cm,
 - 6 à compressão simples de CPs CA;
 - 6 à compressão simples de CPs CU;
- b) ensaios CAPULOT em corpos de prova cúbicos de 10 cm de aresta,
 - 6 CAPULOT CA;
 - 6 CAPULOT CU;
- c) ensaios em painéis,
 - 12 extrações e ensaios à compressão simples de testemunhos CA;
 - 12 extrações e ensaios à compressão simples de testemunhos CU;
 - 16 SBPULOT CA;
 - 16 SBPULOT CU.

Também se realizaram medidas de maturidade do concreto de todas as placas por meio de sensores colocados no interior da cada placa, registros de temperatura ambiente e velocidade do vento na vizinhança dos painéis durante os dois dias seguintes à colocação do concreto. A seguinte Tabela 4.5 apresenta o resumo geral de todos os ensaios e medições feitos na Etapa 2 deste trabalho, que alcançou 4.130 ensaios e medições.

Tabela 4.5 – Resumo geral de ensaios e medições da Etapa 2

Eventos	C1 38 MPa	C2 40 MPa	C3 38MPa	C4 33 MPa	C5 24 MPa	C6 18 MPa	Total
Medições de vento e temperatura ambiente	48 medições	48 medições	48 medições	48 medições	48 medições	48 medições	288
Moldagem de Painéis	Painéis com cura úmida			Painéis com cura no ar			26
	C1 y C3 38 MPa	4 Painéis de 40 MPa	13	C1 y C3 38 MPa	4 Painéis de 40 MPa	13	
	C2 40 MPa	3 Painéis de 41 MPa		C2 40 MPa	3 Painéis de 41 MPa		
	C4 33 MPa	2 Painéis de 33 MPa		C4 33 MPa	2 Painéis de 33 MPa		
	C5 24 MPa	2 Painéis de 24 MPa		C5 24 MPa	2 Painéis de 24 MPa		
	C6 18 MPa	2 Painéis de 18MPa		C6 18 MPa	2 Painéis de 18MPa		
Medições de maturidade do concreto	Painéis com cura úmida			Painéis com cura no ar			192
	C1 y C3 38 MPa	4 mediçõesx 2 termocuplax 4 Painéis	32	C1 y C3 38 MPa	4 mediçõesx 2 termocuplax 4 Painéis	32	
	C2 40 MPa	4 mediçõesx 2 termocuplax 2 Painéis	16	C2 40 MPa	4 mediçõesx 2 termocuplax 2 Painéis	16	
	C4 33 MPa	4 mediçõesx 2 termocuplax 2 Painéis	16	C4 33 MPa	4 mediçõesx 2 termocuplax 2 Painéis	16	
	C5 24 MPa	4 mediçõesx 2 termocuplax 2 Painéis	16	C5 24 MPa	4 mediçõesx 2 termocuplax 2 Painéis	16	
	C6 18 MPa	4 mediçõesx 2 termocuplax 2 Painéis	16	C6 18 MPa	4 mediçõesx 2 termocuplax 2 Painéis	16	
Moldagem de CPS	Cura úmida			Cura no ar			504
	C1 y C3 38 MPa	42 CPS 10 x 20 x 2 eventos	84	C1 y C3 38 MPa	42 CPS 10 x 20 x 2 eventos	84	
	C2 40 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	42	C2 40 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	42	
	C4 33 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	42	C4 33 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	42	
	C5 24 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	42	C5 24 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	42	
	C6 18 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	42	C6 18 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	42	
Moldagem de provetas CAPULOT	Cura úmida			Cura no ar			504
	C1 y C3 38 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 2 eventos	84	C1 y C3 38 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 2 eventos	84	
	C2 40 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 1 evento	42	C2 40 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 1 evento	42	
	C4 33 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 1 evento	42	C4 33 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 1 evento	42	
	C5 24 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 1 evento	42	C5 24 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 1 evento	42	
	C6 18 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 1 evento	42	C6 18 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 1 evento	42	
Extração de testemunhos	Painéis com cura úmida			Painéis com cura no ar			528
	C1 y C3 38 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 4 Painéis	88	C1 y C3 38 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 4 Painéis	88	
	C2 40 MPa	18 testemunhos Ø 10 cmx 2 Painéis	36	C2 40 MPa	18 testemunhos Ø 10 cmx 2 Painéis	36	
		8 testemunhos Ø 10 cmx 1 painel	8		8 testemunhos Ø 10 cmx 1 painel	8	
	C4 33 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 2 Painéis	44	C4 33 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 2 Painéis	44	
	C5 24 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 2 Painéis	44	C5 24 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 2 Painéis	44	
C6 18 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 2 Painéis	88	C6 18 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 2 Painéis	88		
Ensaio a compressão de CPS	Cura úmida			Cura no ar			528
	C1 y C3 38 MPa	42 CPS 10 x 20 x 2 eventos	88	C1 y C3 38 MPa	42 CPS 10 x 20 x 2 eventos	88	
	C2 40 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	44	C2 40 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	44	
	C4 33 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	44	C4 33 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	44	
	C5 24 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	44	C5 24 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	44	
	C6 18 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	44	C6 18 MPa	42 CPS 10 x 20 x 1 evento	44	
SBPULOT em Painéis	Painéis com cura úmida			Painéis com cura no ar			528
	C1 y C3 38 MPa	22 ensaios SBPULOT x 4 Painéis	88	C1 y C3 38 MPa	22 ensaios SBPULOT x 4 Painéis	88	
	C2 40 MPa	18 ensaios SBPULOT x 2 Painéis	36	C2 40 MPa	18 ensaios SBPULOT x 2 Painéis	36	
		8 ensaios SBPULOT x 1 painel	8		8 ensaios SBPULOT x 1 painel	8	
	C4 33 MPa	22 ensaios SBPULOT x 2 Painéis	44	C4 33 MPa	22 ensaios SBPULOT x 2 Painéis	44	
	C5 24 MPa	22 ensaios SBPULOT x 2 Painéis	44	C5 24 MPa	22 ensaios SBPULOT x 2 Painéis	44	
C6 18 MPa	22 ensaios SBPULOT x 2 Painéis	44	C6 18 MPa	22 ensaios SBPULOT x 2 Painéis	44		
CAPULOT	Cura úmida			Cura no ar			504
	C1 y C3 38 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 2 eventos	84	C1 y C3 38 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 2 eventos	84	
	C2 40 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 1 evento	42	C2 40 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 1 evento	42	
	C4 33 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 1 evento	42	C4 33 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 1 evento	42	
	C5 24 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 1 evento	42	C5 24 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 1 evento	42	
	C6 18 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 2 eventos	42	C6 18 MPa	42 provetas CAPULOT 10x10x10 x 2 eventos	42	
Ensaio a compressão de testemunhos	Painéis com cura úmida			Painéis com cura no ar			528
	C1 y C3 38 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 4 Painéis	88	C1 y C3 38 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 4 Painéis	88	
	C2 40 MPa	18 testemunhos Ø 10 cmx 2 Painéis	36	C2 40 MPa	18 testemunhos Ø 10 cmx 2 Painéis	36	
		8 testemunhos Ø 10 cmx 1 painel	8		8 testemunhos Ø 10 cmx 1 painel	8	
	C4 33 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 2 Painéis	44	C4 33 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 2 Painéis	44	
	C5 24 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 2 Painéis	44	C5 24 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 2 Painéis	44	
C6 18 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 4 Painéis	44	C6 18 MPa	22 testemunhos Ø 10 cmx 4 Painéis	44		
Total ensaios e medições :							4130

4.4.5 Execução dos Experimentos

4.4.5.1 Execução dos painéis

Moldaram-se quatro painéis por série, com exceção do evento 2, onde foram feitos cinco painéis levemente mais pequenos para a concretagem. As dimensões médias dos painéis dos eventos 1, 3, 4, 5 e 6 foram de 1,1 m x 1,9 m, enquanto os painéis do evento 2 foram em média de 0,9 m x 1,9 m. Em todos os casos as espessuras dos painéis foram de 0,2 m.

Os eventos de concretagem foram executados nas seguintes datas:

- a) Concretagem 1 em 19 de julho de 2014;
- b) Concretagem 2 em 25 de julho de 2014;
- c) Concretagem 3 em 2 de agosto de 2014;
- d) Concretagem 4 em 22 de agosto de 2014;
- e) Concretagem 5 em 3 de outubro de 2014;
- f) Concretagem 6 em 30 de outubro de 2014.

Os painéis, ou melhor, placas, identificaram-se com letras A, B, C e D respectivamente, segundo o esquema da Figura 4.24. Nas seguintes imagens mostra-se a preparação das estruturas para os painéis. Na Figura 4.25, apresenta-se a montagem da fôrma para esse ensaio, e, na Figura 4.26, a fixação de barras de ensaio ao nível correspondente.

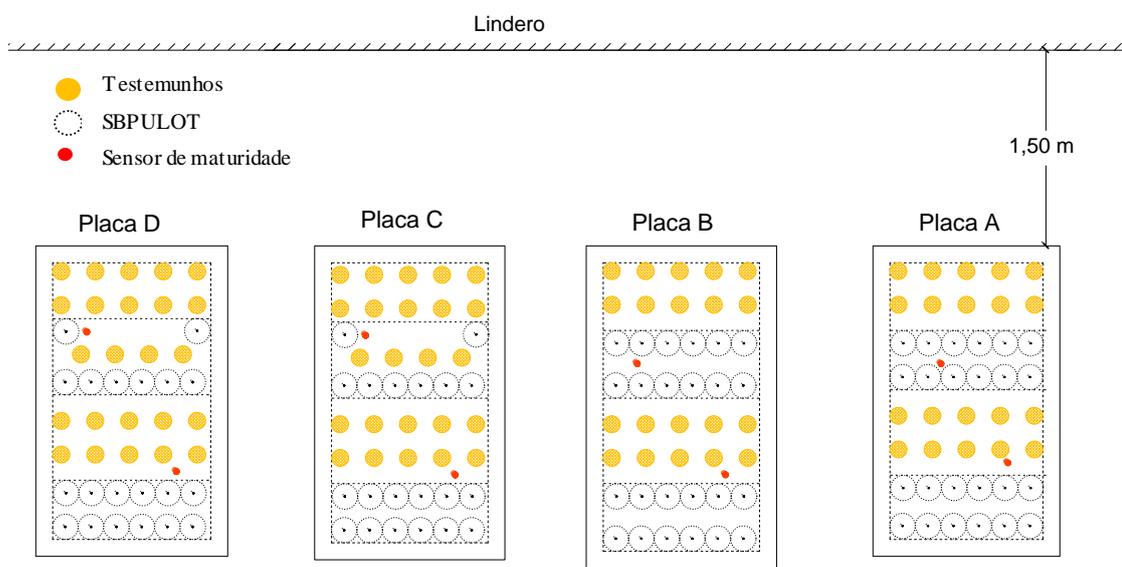


Figura 4.24 – Esquema de localização de painéis na Concretagem 1

Já que foram executados dois tipos de ensaios em diferentes idades em um mesmo painel, foram adotadas separações mínimas para evitar interferências entre os ensaios. Entre os testemunhos e as bordas do painel a separação mínima foi 1 diâmetro (10 cm). Entre os SBPULOT e as bordas do painel a separação mínima foi de 3 vezes o cobrimento da barra, ou seja 15 cm. A separação mínima entre painéis foi de 1 m em função do espaço disponível no campo experimental.



Figura 4.25 – Montagem da fôrma e colocação de suportes de barras de ensaio em painéis

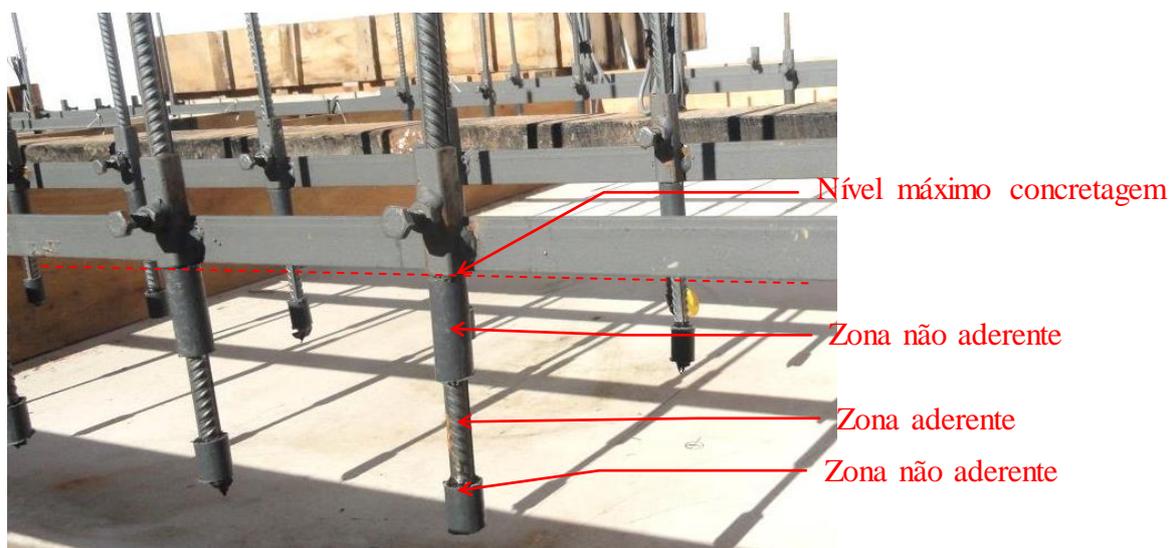


Figura 4.26 – Fixação de barras de ensaio ao nível correspondente, com indicação das zonas aderente e não aderente

Os sensores termopares também foram colocados previamente à concretagem, os quais se identificaram, por exemplo, PAS1, que corresponde ao sensor N.º 1 colocado no Painel A.

Cada identificação foi realizada com etiquetas fixadas aos fios de cada sensor, segundo registrado na Figura 4.27. Dessa forma, os painéis ficaram prontos para sucederem-se as concretagens, conforme Figura 4.28. Também foi registrado as condições atmosféricas do ambiente através do medidor da Figura 4.29 de temperatura e velocidade do vento.



Figura 4.27 – Colocação sensores para medição da maturidade



Figura 4.28 – Vista dos painéis prontos para a concretagem



Figura 4.29 – Medidor de temperatura ambiente e velocidade do vento

Prepararam-se os moldes para CPs e corpos de prova CAPULOT. A superfície interna foi lubrificada com azeite para melhorar o processo de desmoldagem dos corpos de prova. A Figura 4.30, Figura 4.31 e Figura 4.32 mostram, respectivamente, o processo de montagem de um molde CAPULOT, a fixação dos separadores para regiões não aderentes e a fixação das barras nos moldes CAPULOT.



Figura 4.30 – Montagem dos moldes CAPULOT



Figura 4.31 – Fixação dos separadores para regiões não aderentes



Figura 4.32 – Fixação das barras nos moldes CAPULOT

Em cada evento, utilizou-se apenas uma amassada (caminhão betoneira) de concreto. O volume foi distribuído entre os moldes de painéis e corpos de prova preparados. Previamente à descarga do concreto, segundo Figura 4.33, verificaram-se seu tempo de transporte, seu abatimento e sua temperatura de chegada, segundo Figura 4.34.



Figura 4.33 – Descarga do concreto em painéis



Figura 4.34 – Ensaio de consistência, conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998) e controle de temperatura, com leituras de, respectivamente, 70 mm e 23,4 °C

A concretagem dos painéis foi feita em duas camadas de 10 cm cada uma, cuja primeira é apresentada na Figura 4.35, e o adensamento realizou-se com um vibrador de imersão de 32mm após o preenchimento com a segunda, conforme Figura 4.36.

Uma vez finalizado o adensamento do concreto, realizou-se a regularização da superfície com uma desempenadeira de metal lisa, conforme Figura 4.37, e procedeu-se a colocação dos listões de poliestireno expandido nas bordas dos painéis, segundo Figura 4.38. Ao contrário dos painéis submetidos à cura por aspersão (CA), conforme Figura 4.39, esses painéis com bordas foram submetidos à condição de cura úmida (CU) para formar uma capa de água, conforme Figura 4.40.



Figura 4.35 – Primeira camada de concreto colocada



Figura 4.36 – Adensamento de segunda capa de concreto



Figura 4.37 – Regularização da superfície dos painéis



Figura 4.38 – Colocação de bordas de poliestireno expandido nos painéis para manter a água de cura



Figura 4.39 – Cura tipo CA por aspersão de água



Figura 4.40 – Cura tipo CU por película de água permanente sobre o painel

4.4.5.2 Moldagem de corpos de prova

Durante o tempo da concretagem foi realizada a moldagem de corpos de prova (CPs) e CAPULOT. Nos CPs o concreto foi colocado também em duas camadas de 10 cm de espessura, e o adensamento realizou-se em uma mesa vibratória depois da colocação de camadas conforme Figura 4.41.



Figura 4.41 – Adensamento de corpos de prova na mesa vibratória

Nos corpos de prova CAPULOT, o concreto foi colocado em apenas uma etapa, conforme Figura 4.42. O adensamento realizou-se ao final da mesma, também na mesa vibratória. Em sequência, seguem as Figura 4.43 e Figura 4.44, as quais mostram, respectivamente, os corpos de prova CAPULOT e CPs recém moldados e em cura no ar. No dia seguinte, procedeu-se a desmoldagem dos corpos de prova CAPULOT e CPs, como se mostra na Figura 4.45.



Figura 4.42 – Colocação do concreto em uma forma CAPULOT



Figura 4.43 – Corpos de prova CAPULOT e CPs recém moldados



Figura 4.44 – Vista geral de corpos de prova CAPULOT e CPs



Figura 4.45 – Desmoldagem de corpos de prova CAPULOT

4.4.5.3 Identificação e cura de corpos de prova

Os CPs foram identificados por um conjunto de letras e números, como em C1 19 07 CA CP 08, onde:

- a) “C1” indica a concretagem, que, nesse caso, corresponde à Concretagem 1;
- b) “19 07” indica a data da execução dessa concretagem, que, nesse caso, corresponde à 19/07, ou seja, 19 de julho;
- c) “CA” indica o tipo de cura, que, nesse caso, corresponde à cura no ambiente (CA);
- d) “CP 08” indica a numeração do corpo de prova, que, nesse caso, corresponde ao 08.

De maneira similar, os corpos de prova CAPULOT foram identificados por um conjunto de letras e números, como em C1 19 07 CU CAP 03, onde:

- a) “C1” indica a concretagem, que, nesse caso, corresponde à Concretagem 1;
- b) “19 07” indica a data da execução dessa concretagem, que, nesse caso, corresponde à 19/07, ou seja, 19 de julho;
- c) “CU” indica o tipo de cura, que, nesse caso, corresponde à cura úmida (CU);
- d) “CAP 03” indica a numeração do corpo de prova CAPULOT, que, nesse caso, corresponde ao 03.

Esta identificação, transformada em códigos de barra, foi colocada em cada um dos corpos de prova por meio de etiquetas adesivas, como a da Figura 4.46. Esse sistema permite uma melhor identificação e rastreabilidade dos corpos de prova, segundo Figura 4.47, em vista do grande volume de trabalho, evitando confusões na nomenclatura.



Figura 4.46 – Vista da etiqueta de identificação de um CP



Figura 4.47 – Corpos de prova desmoldados e identificados

Tanto os CPs como os corpos de prova CAPULOT foram separados por grupos de idades de ensaios. Os corpos de prova com cura úmida foram introduzidos no tanque de água de cura até seis horas antes do seu ensaio, e os de cura ao ambiente foram armazenados em um lugar protegido nas instalações do laboratório, conforme Figura 4.48.

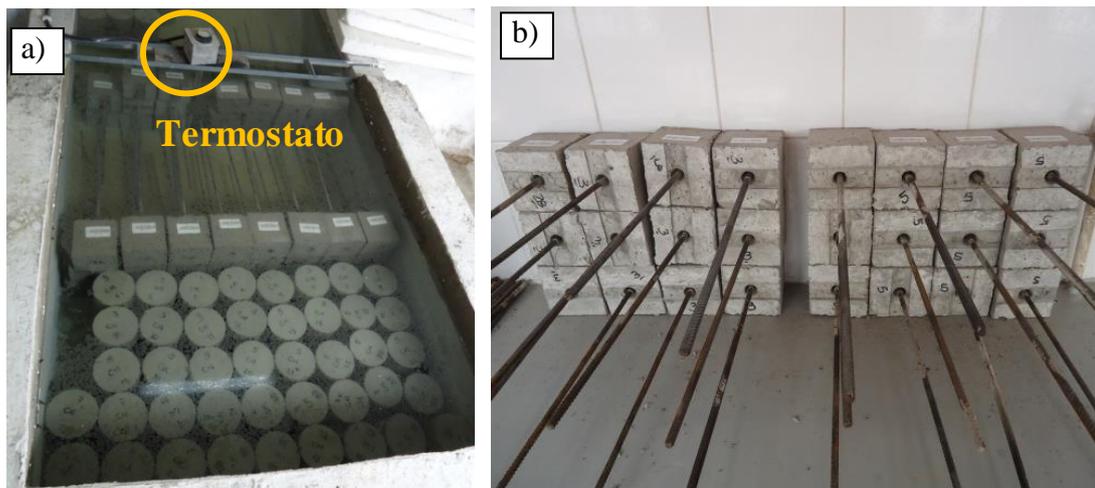


Figura 4.48 – Armazenamento e cura de corpos de prova. a) Cura úmida tanque de água conta com um termostato para garantir a temperatura de 23 ± 2 °C. b). Cura ao ambiente do laboratório

4.4.5.4 Execução de ensaios

Em cada data prevista de ensaios, desenvolveram-se as atividades que se mostram a seguir.

4.4.5.4.1 Extração, corte e ensaios à compressão simples dos testemunhos

Empregaram-se duas máquinas extratoras com sondas rotativas diamantadas de 10 cm de diâmetro nominal para extrair os testemunhos nos lugares previstos para cada idade, segundo Figura 4.49. Devido ao grande número de testemunhos a extrair, utilizaram-se duas máquinas de iguais características.



Figura 4.49 – Extração de testemunhos

Os testemunhos extraídos foram identificados por um conjunto de letras e números, como em C1 19 07 CA T3 B1, onde:

- a) “C1” indica a concretagem, que, nesse caso, corresponde à Concretagem 1;
- b) “1907” indica a data da execução dessa concretagem, que, nesse caso, corresponde à 19/07, ou seja, 19 de julho;
- c) “CA” indica o tipo de cura, que, nesse caso, corresponde à cura por aspersão (CA);
- d) “T3” indica a idade de extração do testemunho, que, nesse caso, corresponde à 3 dias;
- e) “B” indica a numeração do painel do qual o testemunho foi extraído, que, nesse caso, corresponde ao painel B;
- f) “1” indica a numeração do testemunho extraído desse painel, que, nesse caso, corresponde ao 1.

Realizou-se o corte das bordas para regularizar as bases dos testemunhos, ou seja, sua retificação, com uma serra circular de corte, segundo mostrado na Figura 4.50, tentando manter a relação altura/diâmetro próxima a 2, conforme aos critérios da norma NBR 7680-1:2015 (ABNT, 2015e). Controlaram-se as dimensões (diâmetro e altura dos testemunhos) com um calibre de 0,1 mm de precisão. Também se verificou a verticalidade da superfície lateral com respeito às bases.



Figura 4.50 – Regularização de bases e topos dos testemunhos

Mediram-se as espessuras das seções retiradas das bases, conforme Figura 4.51. As medidas mostraram uma espessura média de 21 mm que foi retirado das bases superior e inferior de cada testemunho como se mostra a seguir, no gráfico da Figura 4.52.



Figura 4.51 – Medição das fatias dos testemunhos

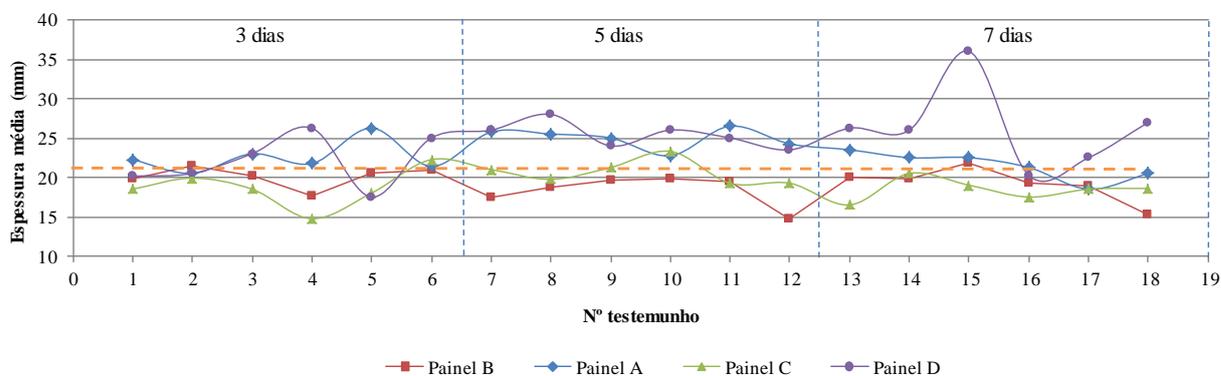


Figura 4.52 – Gráfico das espessuras das fatias dos testemunhos nas primeiras idades da Concretagem 5

Uma vez preparados os testemunhos, procedeu-se seu ensaio à compressão simples numa prensa hidráulica automática (marca FORNEY, modelo F-25-EX-R-TPILOT) de 1.100 kN de capacidade e 0,01 kN de precisão, que conta com certificado de calibração do *Instituto Nacional de Tecnologia y Normalización do Paraguai (INTN)* N.º 904, a qual está ilustrada na Figura 4.53 abaixo.



Figura 4.53 – Prensa hidráulica de compressão empregada

A prensa hidráulica conta com um sistema de leitura e registro que permite descarregar os resultados dos ensaios de compressão axial de testemunhos, conforme a Figura 4.53, em um computador, em arquivos de formato “.txt” por meio do *software* PuTTY versão 0.61 para Windows 7.O ensaio à compressão simples realizou-se conforme às especificações da norma NBR 5739:2007 (ABNT, 2007a).

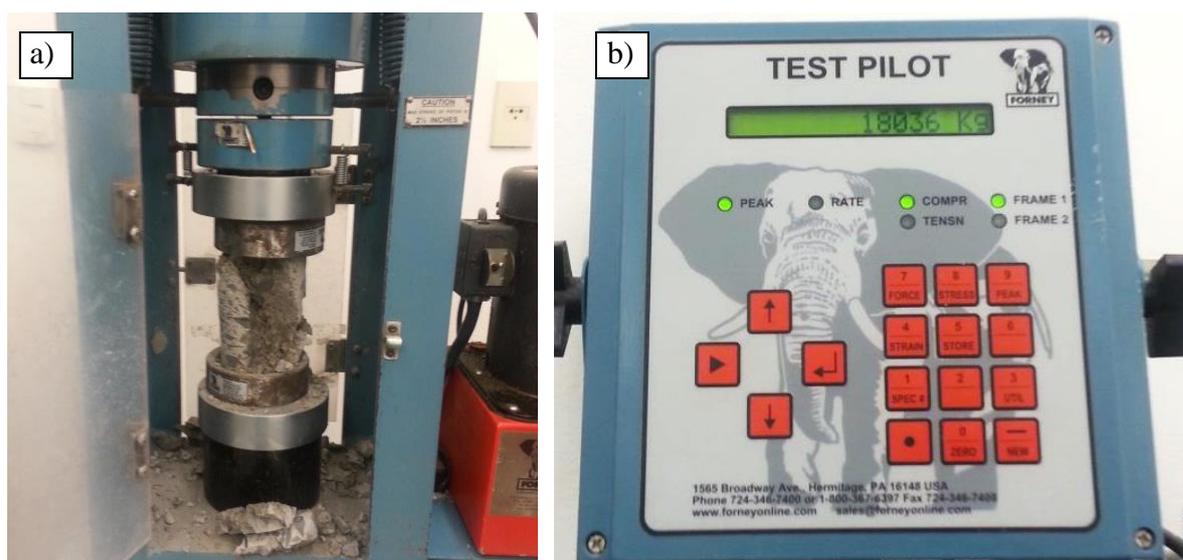


Figura 4.54 – a) Ensaio à compressão simples de testemunho. b) Sistema de leitura e registro

4.4.5.4.2 Ensaios à compressão simples de CPs

Os CPs foram submetidos a ensaios à compressão simples, da mesma forma que os testemunhos. Os CPs submetidos à cura no ar (CA) foram ensaiados nas mesmas condições do armazenamento, enquanto os CPs submetidos à cura úmida (CU) foram retirados dos tanques de água de cura seis horas antes do ensaio e mantidos em condições de laboratório até o momento do ensaio.

4.4.5.4.3 Controle de maturidade

Realizaram-se as medidas de maturidade em cada idade de ensaio. Os sensores contam com sua própria memória interna incorporada onde registram as medidas de temperatura e o tempo decorrido desde a colocação do concreto a intervalos regulares programáveis. Neste caso, programaram-se intervalos de 30 minutos, conforme a norma ASTM C1074-11 (ASTM, 2011). A memória interna armazena até um máximo de 2.048 leituras de temperatura e tempo. Os dados podem ver-se e descarregar a um computador por meio do *software* Command Center version 1.3.43b para Windows. Os sensores ligam-se ao computador por meio de condutores de dois fios tipo CCA e um dispositivo adaptador USB, como apresentado na Figura 4.55. Os dados descarregam-se em arquivos de formato “.csv” editáveis com planilhas eletrônicas, segundo Figura 4.56.

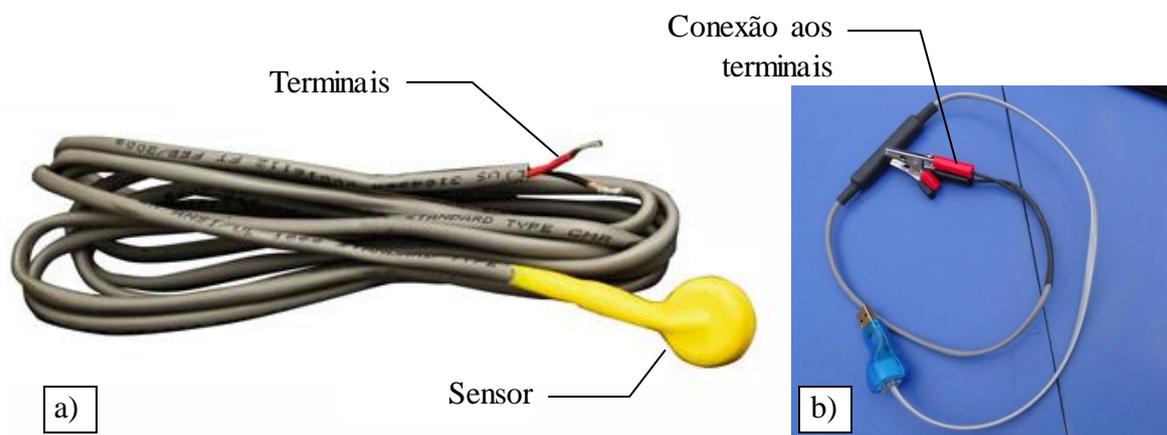


Figura 4.55 – a) Sensor para medição da maturidade b) Adaptador USB para descarga de dados

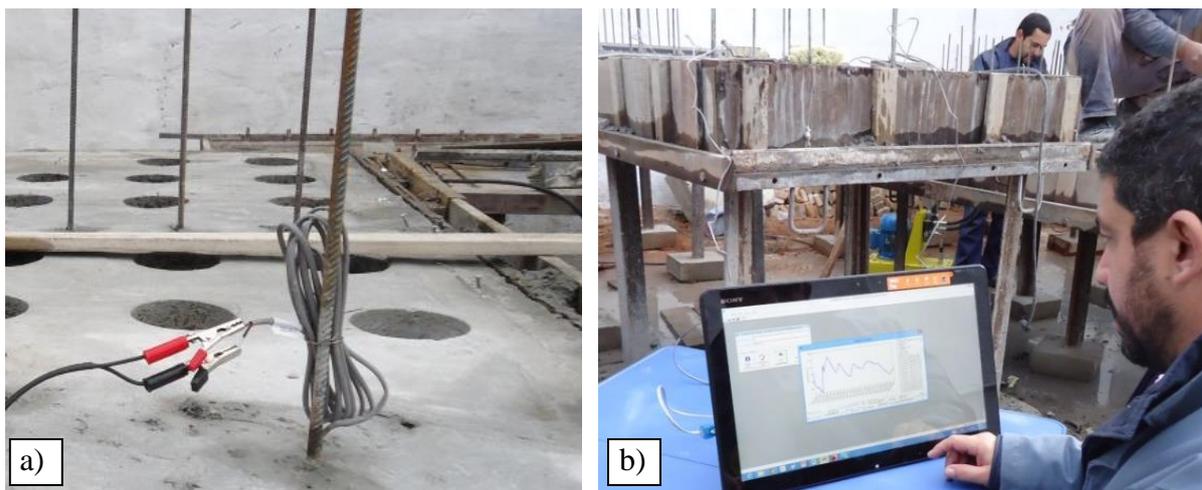


Figura 4.56 – a) Conexão aos sensores de maturidade. b) Descarga de leituras de maturidade ao computador

O programa também oferece relatórios detalhados de cada sensor com os gráficos correspondentes de temperatura versus tempo, apresentado na Figura 4.57, referente à Concretagem 1.

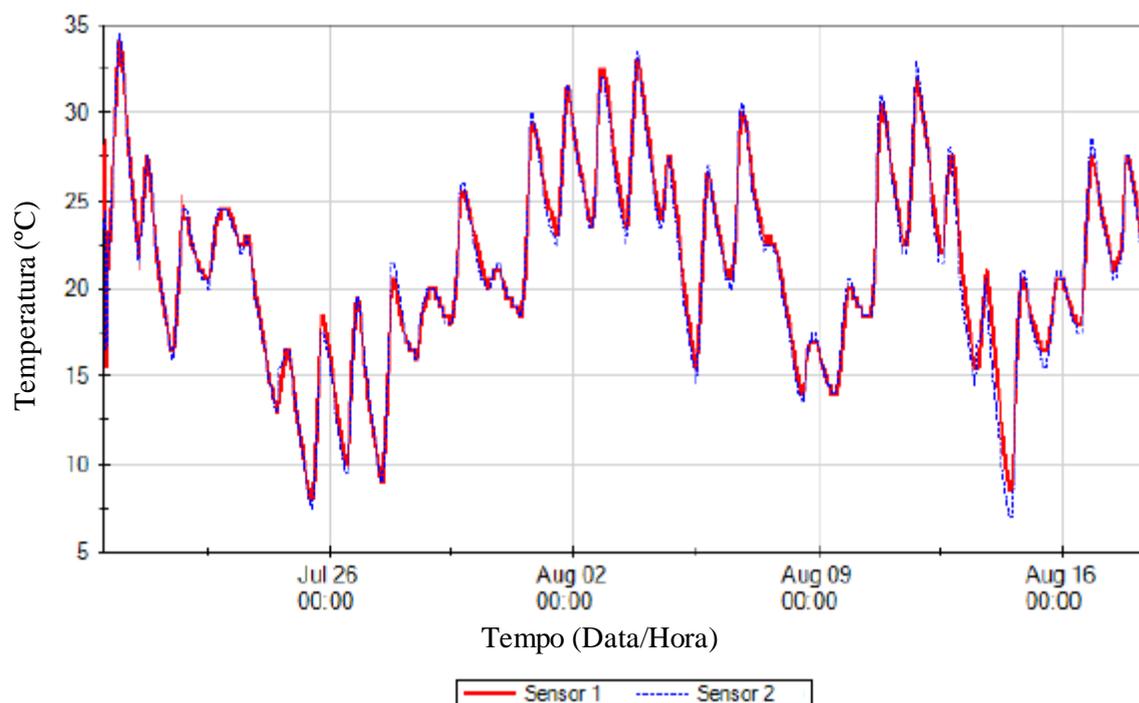


Figura 4.57 – Temperatura vs tempo dos sensores do painel B da Concretagem 1 (28 dias)

A Figura 4.58 corresponde as primeiras 24 horas do registro indicado na Figura 4.57. Pode-se observar um incremento pequeno da temperatura nas primeiras 3 horas logo do concretagem,

seguido por um período curto onde a temperatura diminui e logo apresenta um grande incremento. Este comportamento reflete perfeitamente o mecanismo de hidratação da alita conforme foi detalhado no Capítulo 2 como pode-se comparar com as curvas superpostas na Figura 4.59.

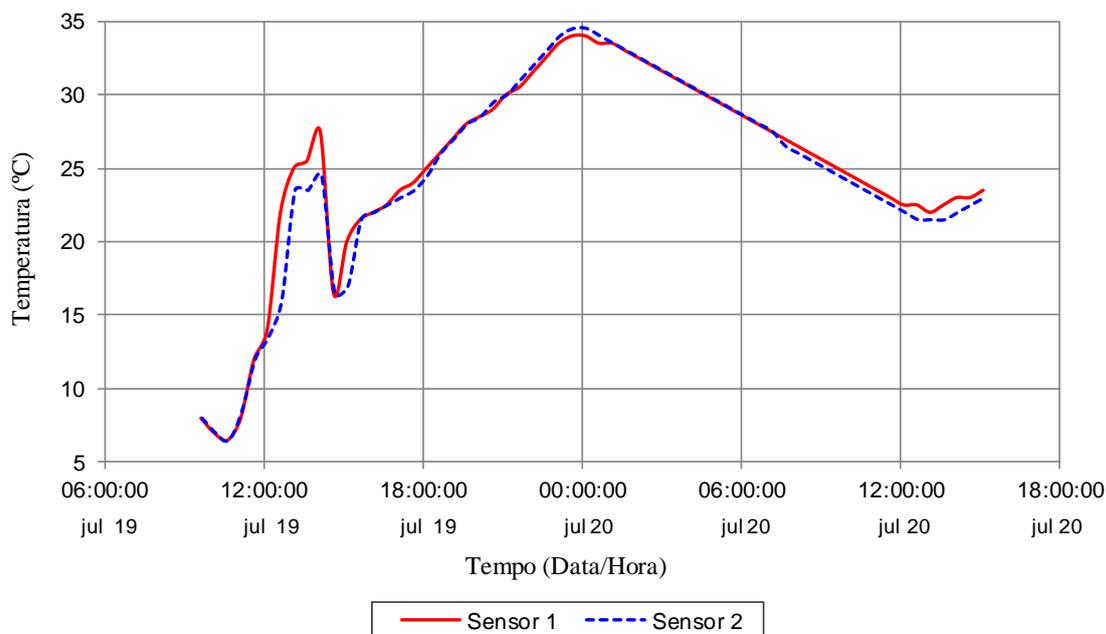


Figura 4.58 – Temperatura vs tempo dos sensores do painel B da Concretagem 1 nas primeiras 24 horas

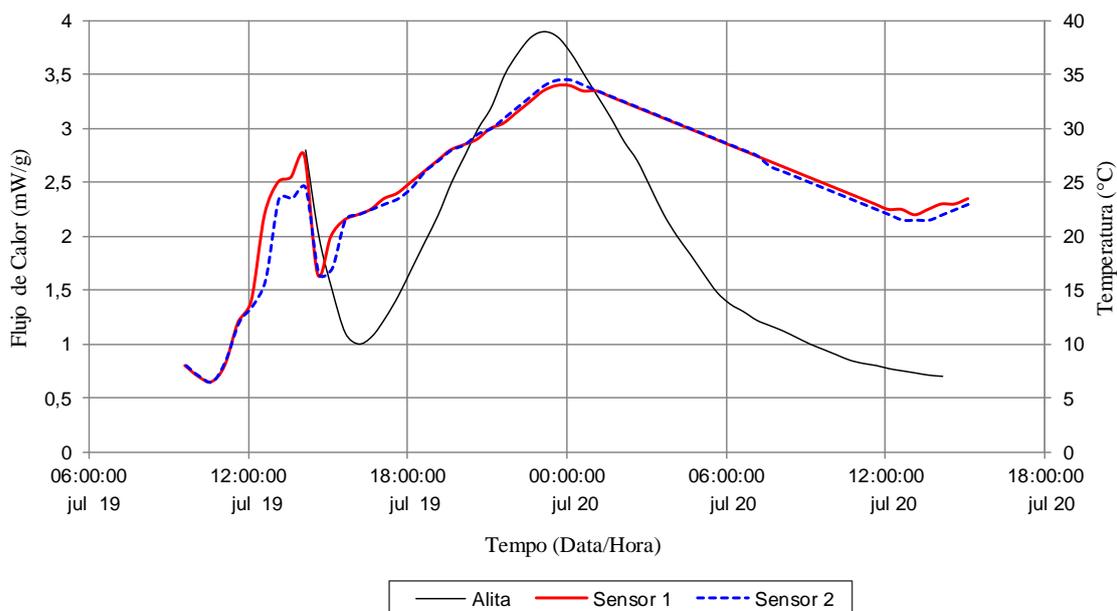


Figura 4.59 – Comparação do fluxo de calor da hidratação da alita e da temperatura interna do concreto nas primeiras 24 horas. Painel B, Concretagem 1.

A Figura 4.60 fornecida por o mesmo programa e apresenta o índice de maturidade versus o tempo. Os marcadores correspondem aos índices quantificados às idades dos ensaios.

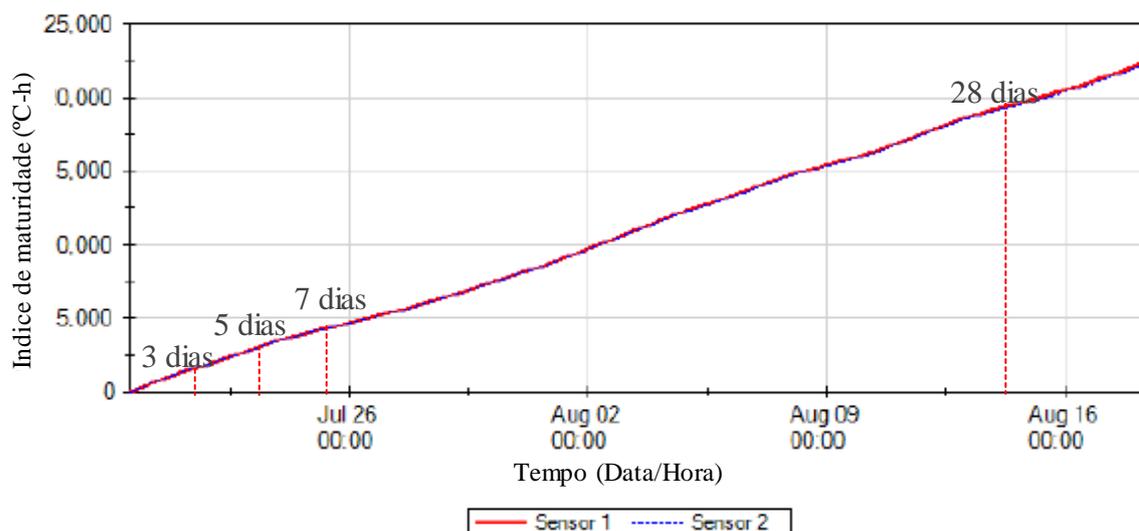


Figura 4.60 – Maturidade vs tempo dos sensores do painel B da Concretagem 1

4.4.5.4.4 Ensaios SBPULOT

Os ensaios de arrancamento nos painéis realizaram-se mediante o conjunto hidráulico descrito no item 4.2.2. Nesta Etapa 2 do experimento, realizou-se uma nova calibração do conjunto hidráulico com a prensa hidráulica, conforme Figura 4.61, a fim de obter a expressão que relacione os valores de pressão aplicada (medidos no manômetro) e a força correspondente (medida na prensa hidráulica).

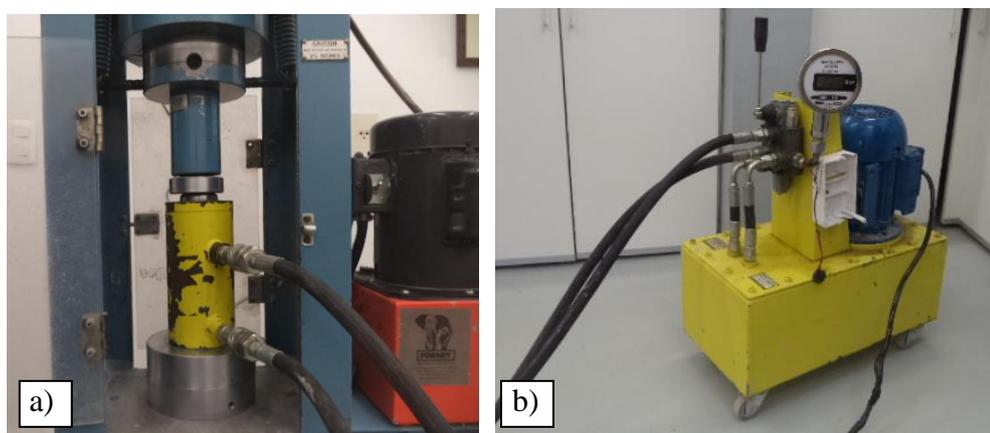


Figura 4.61 – Calibração do conjunto hidráulico a) Carga no cilindro na prensa. b) Sistema hidráulico e manômetro

A Figura 4.62 mostra o gráfico da reta e a expressão de correlação obtidas. Pode-se ver a grande similaridade com a reta da Figura 4.11, da calibração feita na Etapa 1, no laboratório Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

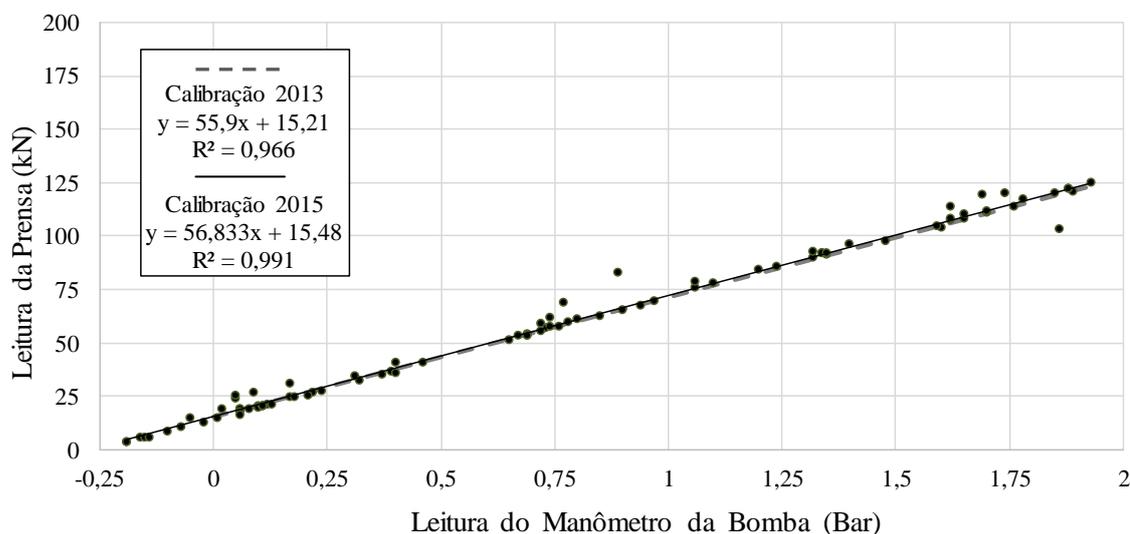


Figura 4.62 –Correlação entre leitura do manômetro e leitura da prensa da Etapa 2.

4.4.5.4.5 Ensaio nos painéis

Realizaram-se os ensaios tipo SBPULOT de acordo com o procedimento descrito no item 4.2.2, como mostrado na Figura 4.63 abaixo. Utilizou-se um disco de neoprene como base de apoio do dispositivo sobre o painel de concreto. As medidas de pressão obtidas no manômetro convertem-se a sua correspondente medida de força de arrancamento, mediante a curva de correlação obtida na calibração do conjunto hidráulico.



Figura 4.63 – Ensaio SBPULOT em painéis

Para evitar variações de medida, todos os testes foram conduzidos com uma bomba hidráulica eléctrica, a uma taxa de carregamento de $25,5 \pm 8,5$ kN / min e uma duração de teste de 19 ± 4 s. A velocidade ficou dentro da faixa da velocidade que não têm influência significativa sobre os resultados tensão máximo de aderência de acordo a Silva (2014).

4.4.5.4.6 Ensaios CAPULOT

Com o mesmo procedimento adotado no item anterior, executaram-se os ensaios de arrancamento nos corpos de prova CAPULOT, segundo Figura 4.64. Nesse caso, utilizaram-se dois discos de neoprene, colocados abaixo e sobre o corpo de prova para regularizar o apoio, como se mostra na Figura 4.64 b.



Figura 4.64 – a) Ensaio em corpo de prova CAPULOT. b) Detalhe dos discos de neoprene em ensaio em corpo de prova CAPULOT

Como descrito anteriormente, convertem-se as medidas de pressão obtidas no manômetro a seu correspondente de força de arrancamento mediante a curva de correlação obtida na calibração do conjunto hidráulico.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo são apresentados todos os resultados obtidos nos trabalhos feitos no laboratório (Etapa 1), em escala real (Etapa 2). Apresentam-se, também, os procedimentos empregados nas análises estatísticas feitas e as conclusões preliminares atingidas nas mesmas.

5.2 ETAPA 1: RESULTADOS DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Neste item apresentam-se os resultados obtidos nos trabalhos feitos no laboratório.

Na primeira concretagem, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm para o controle da resistência à compressão simples, corpos de prova APULOT de 85 mm x 100 mm e corpos de prova prismáticos de 80 mm x 80 mm x 100 mm nas quantidades indicadas no capítulo 4. Os corpos de prova cilíndricos e os APULOT foram testados nas idades de 3, 5, 7 e 28 dias. Os prismáticos foram testados aos 7 dias. Os resultados obtidos foram agrupados segundo sua idade e tipo de corpo de prova. Para cada amostra, foram calculadas sua média, seu desvio padrão e o coeficiente de variação correspondente.

Na segunda concretagem, foram moldados, também, corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm para o controle da resistência à compressão simples, corpos-de-prova APULOT de 85 mm x 100 mm e prismáticos de 80 mm x 80 mm x 100 mm, de 125 mm x 125 mm x 100 mm, de 160 mm x 160 mm x 100 mm e de 200 mm x 200 mm x 200 mm nas quantidades indicadas no Capítulo 4. Os resultados foram tratados da mesma forma que os da primeira concretagem.

Na terceira e última concretagem, foram moldados, também, corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm para o controle da resistência à compressão simples, corpos de prova APULOT de 85 mm x 100 mm e prismáticos de 80 mm x 80 mm x 100 mm, de 85 mm x 85 mm x 100 mm, de 100 mm x 100 mm x 100 mm, de 125 mm x 125 mm x 100 mm, de 160 mm x 160 mm x 100 mm e de 200 mm x 200 mm x 200 mm nas quantidades indicadas no capítulo anterior. Os resultados foram tratados da mesma forma que nas duas concretagens prévias.

Nas seguintes tabelas, apresentam-se os resumos dos resultados de resistência à compressão simples e de tensão última de aderência para esses corpos-de-prova. Conforme os resultados apresentados na Tabela 5.1, os concretos apresentaram resistências médias à compressão entre 25,4 MPa e 31,3 MPa aos 7 dias e 32,2 MPa e 41,0 MPa aos 28 dias.

Tabela 5.1 – Resultados de resistência à compressão simples em corpos de prova de 10 cm x 20 cm.

Concretagem N°	Idade (dias)	f_c média (MPa)	s (MPa)	cv (%)
C1	3	24,8	1,9	7,7
	5	27,8	0,2	0,7
	7	31,3	1,0	3,2
	28	39,1	0,7	1,8
C2	3	17,8	1,4	7,9
	5	20,9	0,8	3,8
	7	25,4	1,4	5,5
	28	32,2	1,4	4,3
C3	3	25,8	2,4	9,3
	5	28	1,7	6,1
	7	32,6	1,2	3,7
	28	41,0	1,3	3,2

Os valores médios de tensão máxima de aderência obtidos nos APULOT, conforme Tabela 5.2, mostram uma tendência crescente entre 3 e 28 dias com um máximo de 21,4 MPa aos 28 dias com variações de até 18,2 %.

Tabela 5.2 – Resultados das médias das tensões máxima de aderência em corpos de prova APULOT de 85 mm x 100 mm.

Concretagem N°	Idade (dias)	Médias das tensões máximas de aderência (MPa)	s (MPa)	cv (%)
C1	3	13,9	2,2	15,8
	5	15,8	1,9	12
	7	18,5	1,3	7
	28	21,4	3,1	14,5
C2	3	10,2	1,8	17,6
	5	12,4	2,1	16,9
	7	12,6	0,6	4,8
	28	16,5	3	18,2
C3	3	16,8	2,2	13,1
	5	18,6	1,3	7,0
	7	20,8	2,9	13,9
	28	-	-	-

Os ensaios em corpos de prova prismáticos de 80 mm x 80 mm x 100 mm foram feitos aos 3, 5 e 7 dias. Eles mostram tensões máximas de aderência entre 12,4 MPa e 18,0 MPa com variações de até 10,7 %, segundo a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultados das médias das tensões máxima de aderência em corpos de prova prismáticos de 80 mm x 80 mm x 100 mm.

Concretagem N°	Idade (dias)	Médias das tensões máximas de aderência (MPa)	s (MPa)	cv (%)
C1	3	-	-	-
	5	-	-	-
	7	14,9	1,6	10,7
	28	-	-	-
C2	3	9,5	0,9	9,5
	5	10,6	1,1	10,4
	7	12,4	0,7	5,6
	28	-	-	-
C3	3	15,7	1,2	7,6
	5	16,8	1,1	6,5
	7	18	1,3	7,2
	28	-	-	-

Os ensaios em corpos de prova CAPULOT de 85 mm x 85 mm x 100 mm foram feitos aos 3, 5 e 7 dias. A Tabela 5.4 mostra os resultados obtidos que mostram uma tendência crescente no tempo e variações de até 7,0 %.

Tabela 5.4 – Resultados das médias das tensões máxima de aderência em corpos de prova prismáticos de 85mm x 85mm x 100mm.

Concretagem N°	Idade (dias)	Médias das tensões máximas de aderência (MPa)	s (MPa)	cv (%)
C1	-	-	-	-
C2	-	-	-	-
C3	3	16,5	0,8	4,8
	5	17,2	1,2	7,0
	7	19,3	0,8	4,1
	28	-	-	-

Os valores médios de tensão máxima de aderência obtidos nos prismáticos de 100mm x 100mm x 100mm conforme Tabela 5.5, mostram uma tendência crescente entre os 3 e os 7 dias com variações de até 12,9 %.

Tabela 5.5 – Resultados das médias das tensões máxima de aderência em corpos de prova prismáticos de 100mm x 100mm x 100mm.

Concretagem N°	Idade (dias)	Médias das tensões máximas de aderência (MPa)	s (MPa)	cv (%)
C1	-	-	-	-
C2	3	10,1	1,3	12,9
	5	10,8	0,9	8,3
	7	12,6	1,3	10,3
	28	-	-	-
C3	3	16,5	1	6,1
	5	17,4	0,8	4,6
	7	18,2	1,9	10,4
	28	-	-	-

Os ensaios em corpos de prova prismáticos de 125 mm x 125mm x 100 mm foram feitos aos 3, 5 e 7 dias. Os resultados mostram uma tendência crescente entre os 3 e os 7 dias com variações de até 17,6 %, segundo a Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Resultados das médias das tensões máxima de aderência em corpos de prova prismáticos de 125 mm x 125 mm x 100 mm.

Concretagem N°	Idade (dias)	Médias das tensões máximas de aderência (MPa)	s (MPa)	cv (%)
C1	-	-	-	-
C2	3	9,1	1,6	17,6
	5	10,3	1,5	14,6
	7	12,4	1,2	9,7
	28	-	-	-
C3	3	16,7	1,7	10,2
	5	17,1	1,9	11,1
	7	19,2	1,7	8,9
	28	-	-	-

Os ensaios em corpos de prova prismáticos de 160 mm x 160 mm x 100 mm foram feitos aos 3, 5 e 7 dias. Os resultados mostram uma tendência crescente entre os 3 e os 7 dias, com variações de até 13,3 %, segundo a Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Resultados das médias das tensões máxima de aderência em corpos de prova prismáticos de 160 mm x 160 mm x 100 mm da segunda concretagem

Concretagem N°	Idade (dias)	Médias das tensões máximas de aderência (MPa)	s (MPa)	cv (%)
C1	-	-	-	-
C2	3	9	0,7	7,8
	5	10,5	1,4	13,3
	7	11	0,8	7,3
	28	-	-	-
C3	3	16,2	1,2	7,4
	5	17	1,7	10,0
	7	18,7	1,3	7
	28	-	-	-

Os ensaios em corpos de prova prismáticos de 200 mm x 200 mm x 200 mm foram feitos aos 3, 5 e 7 dias. Os resultados mostram uma tendência crescente entre os 3 e os 7 dias, com variações de até 13,3 %, segundo a Tabela 5.8.

Tabela 5.8– Resultados das médias das tensões máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT de 200 mm x 200 mm x 200 mm da segunda concretagem

Concretagem N°	Idade (dias)	Médias das tensões máximas de aderência (MPa)	s (MPa)	cv (%)
C1	1	-	-	-
C2	3	9	0,7	7,8
	5	10,5	1,4	13,3
	7	11	0,8	7,3
	28	-	-	-
C3	3	16,1	1,3	8,1
	5	17,5	1,7	9,7
	7	18,2	1,2	6,6
	28	-	-	-

5.2.1 Conclusões da Etapa 1

A Tabela 5.9 se apresenta o resumo dos resultados dos ensaios feitos na primeira concretagem. Os valores médios correspondentes aos ensaios de arrancamento em corpos de prova APULOT e prismáticos feitos aos 3,5 e 7 dias são muito similares. No entanto, os coeficientes de variação são maiores nos corpos de prova APULOT do que nos prismáticos.

Tabela 5.9 – Resumo dos resultados dos ensaios da primeira concretagem

Elementos ensaiados	Concretagem 1				Variação geral (%)
	Idade				
	3 dias	5 dias	7 dias	28 dias	
CPs 100x200	$\bar{X} = 24,8$ $s = 1,9$ $cv = 7,7$	$\bar{X} = 27,8$ $s = 0,2$ $cv = 0,7$	$\bar{X} = 31,3$ $s = 1$ $cv = 3,2$	$\bar{X} = 39,1$ $s = 0,7$ $cv = 1,8$	3,4
APULOT 85x100	$\bar{X} = 13,9$ $s = 2,2$ $cv = 15,8$	$\bar{X} = 15,8$ $s = 1,9$ $cv = 12,0$	$\bar{X} = 18,5$ $s = 1,3$ $cv = 7,0$	$\bar{X} = 21,4$ $s = 3,1$ $cv = 14,5$	12,3
Prismáticos 80x80x100	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	$\bar{X} = 14,9$ $s = 1,6$ $cv = 10,7$	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	10,7

A Tabela 5.10 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios feitos na segunda concretagem. Também neste caso os valores médios correspondentes aos ensaios de arrancamento em corpos de prova APULOT e prismáticos apresentaram-se muito similares. Mas, os coeficientes de variação corpos de prova APULOT são da ordem do 14%, enquanto que para os corpos de prova prismáticos os coeficientes de variação são da ordem do 11%.

Tabela 5.10 – Resumo dos resultados dos ensaios da segunda concretagem

Elementos ensaiados	Concretagem 2				Variação geral (%)
	Idade				
	3 dias	5 dias	7 dias	28 dias	
CPs 100x200	$\bar{X} = 17,8$ $s = 1,4$ $cv = 7,9$	$\bar{X} = 20,9$ $s = 0,8$ $cv = 3,8$	$\bar{X} = 25,4$ $s = 1,4$ $cv = 5,5$	$\bar{X} = 32,2$ $s = 1,4$ $cv = 4,3$	5,4
APULOT 85x100	$\bar{X} = 10,2$ $s = 1,8$ $cv = 17,6$	$\bar{X} = 12,4$ $s = 2,1$ $cv = 16,9$	$\bar{X} = 12,6$ $s = 0,6$ $cv = 4,8$	$\bar{X} = 16,5$ $s = 3$ $cv = 18,2$	14,4
Prismáticos 80x80x100	$\bar{X} = 9,5$ $s = 0,9$ $cv = 9,5$	$\bar{X} = 10,6$ $s = 1,1$ $cv = 10,4$	$\bar{X} = 12,4$ $s = 0,7$ $cv = 5,6$	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	8,5
Prismáticos 100x100x100	$\bar{X} = 10,1$ $s = 1,3$ $cv = 12,9$	$\bar{X} = 10,8$ $s = 0,9$ $cv = 8,3$	$\bar{X} = 12,6$ $s = 1,3$ $cv = 10,3$	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	10,5
Prismáticos 125x125x100	$\bar{X} = 9,1$ $s = 1,6$ $cv = 17,6$	$\bar{X} = 10,3$ $s = 1,5$ $cv = 14,6$	$\bar{X} = 12,4$ $s = 1,2$ $cv = 9,7$	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	14,0
Prismáticos 160x160x100	$\bar{X} = 10,5$ $s = 2$ $cv = 19,0$	$\bar{X} = 11,7$ $s = 0,9$ $cv = 7,7$	$\bar{X} = 12,1$ $s = 1,1$ $cv = 9,1$	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	11,9
Prismáticos 200x200x200	$\bar{X} = 9$ $s = 0,7$ $cv = 7,8$	$\bar{X} = 10,5$ $s = 1,4$ $cv = 13,3$	$\bar{X} = 11$ $s = 0,8$ $cv = 7,3$	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	9,5

Na Tabela 5.11 apresenta-se o resumo dos resultados dos ensaios feitos na terceira concretagem. Também neste caso os valores médios correspondentes aos ensaios de arrancamento em corpos de prova APULOT e prismáticos apresentaram-se muito similares. Mas, os coeficientes de variação corpos de prova APULOT são da ordem do 11%, enquanto que nos corpos de prova prismáticos os coeficientes de variação são da ordem do 7%.

Tabela 5.11 – Resumo dos resultados dos ensaios da terceira concretagem

Elementos ensaiados	Concretagem 3				Variação geral (%)
	Idade				
	3 dias	5 dias	7 dias	28 dias	
CPs 100x200	$\bar{X} = 25,8$ $s = 2,4$ $cv = 9,3$	$\bar{X} = 28$ $s = 1,7$ $cv = 6,1$	$\bar{X} = 32,6$ $s = 1,2$ $cv = 3,7$	$\bar{X} = 41$ $s = 1,3$ $cv = 3,2$	5,6
APULOT 85x100	$\bar{X} = 16,8$ $s = 2,2$ $cv = 13,1$	$\bar{X} = 18,6$ $s = 1,3$ $cv = 7,0$	$\bar{X} = 20,8$ $s = 2,9$ $cv = 13,9$	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	11,3
Prismáticos 80x80x100	$\bar{X} = 15,7$ $s = 1,2$ $cv = 7,6$	$\bar{X} = 16,8$ $s = 1,1$ $cv = 6,5$	$\bar{X} = 18$ $s = 1,3$ $cv = 7,2$	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	7,1
Prismáticos 85x85x100	$\bar{X} = 16,5$ $s = 0,8$ $cv = 4,8$	$\bar{X} = 17,2$ $s = 1,2$ $cv = 7,0$	$\bar{X} = 19,3$ $s = 0,8$ $cv = 4,1$	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	5,3
Prismáticos 100x100x100	$\bar{X} = 16,5$ $s = 1$ $cv = 6,1$	$\bar{X} = 17,4$ $s = 0,8$ $cv = 4,6$	$\bar{X} = 18,2$ $s = 1,9$ $cv = 10,4$	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	7,0
Prismáticos 125x125x100	$\bar{X} = 16,7$ $s = 1,7$ $cv = 10,2$	$\bar{X} = 17,1$ $s = 1,9$ $cv = 11,1$	$\bar{X} = 19,2$ $s = 1,7$ $cv = 8,9$	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	10,1
Prismáticos 160x160x100	$\bar{X} = 16,2$ $s = 1,2$ $cv = 7,4$	$\bar{X} = 17$ $s = 1,7$ $cv = 10,0$	$\bar{X} = 18,7$ $s = 1,3$ $cv = 7,0$	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	8,1
Prismáticos 200x200x200	$\bar{X} = 16,1$ $s = 1,3$ $cv = 8,1$	$\bar{X} = 17,5$ $s = 1,7$ $cv = 9,7$	$\bar{X} = 18,2$ $s = 1,2$ $cv = 6,6$	$\bar{X} = -$ $s = -$ $cv = -$	8,1

Nos três eventos de concretagem os valores médios correspondentes a cada grupo de ensaios de arrancamento em corpos de prova APULOT e prismáticos apresentaram-se muito similares para cada concreto empregado. No entanto, os coeficientes de variação são maiores nos corpos de prova APULOT do que nos prismáticos. Devido a isso, foram adotados os corpos de prova prismáticos para o desenvolvimento das investigações previstas nas Etapas 2 e 3.

Além disso, os valores de tensão máxima de aderência nos prismáticos se apresentam mais próximos nos corpos de prova de dimensões compreendidas entre 100x100x100 e 200x200x200 como se mostra na Figura 5.1. Com atenção à simplicidade na fabricação das fôrmas de aço, adota-se a dimensão de 100 mm x 100 mm x 100 mm para as fôrmas prismáticas a empregar nas seguintes etapas deste trabalho.

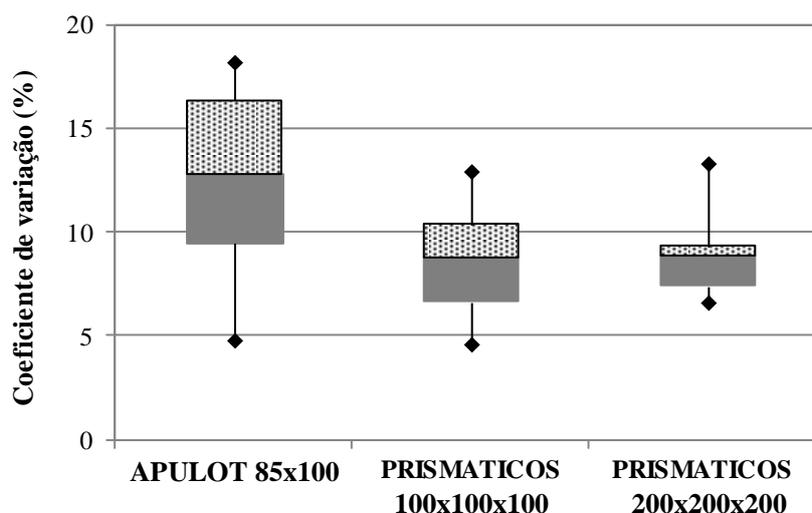


Figura 5.1 – Distribuição das variações dos ensaios.

5.3 ETAPA 2: RESULTADOS DE ENSAIOS EM ESCALA REAL

5.3.1 Fundamentos Estatísticos Empregados

5.3.1.1 Teste de normalidade

Supondo a existência de um grande conjunto de corpos de prova similares, que represente todo o concreto empregado, os resultados dos ensaios mostrarão uma distribuição ou dispersão em relação à resistência média, numa distribuição característica denominada distribuição gaussiana ou normal (ACI, 2014b; FUSCO, 2013; WOGGRIN, 1974). Em função deste conceito e da similaridade com a distribuição de Student aplicada a pequenas amostras ($N < 30$), foi feito o teste de normalidade, o que permitiu a eliminação de valores discrepantes ou outliers.

A comprovação de outliers foi feita seguindo o critério indicado no capítulo 6 da ASTM E178-08 (ASTM, 2014), verificando as Equação 5.1 e Equação 5.2.

$$T_1 = (X_{\text{máx}} - \bar{X})/s < t \quad (5.1)$$

$$T_2 = (X_{\text{mín}} - \bar{X})/s < t \quad (5.2)$$

Onde:

- a) “ T_1 ” é o valor estatístico 1 do teste de normalidade;
- b) “ $X_{\text{máx}}$ ” é o valor máximo da amostra;
- c) “ \bar{X} ” é a média aritmética da amostra;
- d) “ s ” é o desvio padrão da amostra;
- e) “ t ” é o valor fornecido pela Tabela 1 da ASTM E178-08 (ASTM, 2014);
- f) “ T_2 ” é o valor estatístico 2 do teste de normalidade;
- g) “ $X_{\text{mín}}$ ” é o valor mínimo da amostra.

Os valores não conformes com a expressão foram eliminados do conjunto de dados. Após isso, foram calculados os parâmetros estatísticos finais, ou seja, média aritmética, desvio padrão e coeficiente de variação, para cada amostra.

Os níveis de significância adotados são:

- a) 1 % para os resultados de resistência à compressão simples dos CPs e testemunhos;
- b) 5 % para os resultados de tensão última de aderência dos corpos de prova CAPULOT e SBPULOT.

5.3.1.2 Teste “F” de diferenças entre as variâncias

A primeira atividade para estabelecer relações entre amostras é a comprovação das diferenças entre as variâncias. Isso foi feito com o teste de Fischer (teste “F”), o qual consiste na comparação do valor “F” calculado pelo quociente das variâncias e o valor “F” tabelado, com um nível de significância de 5 %, conforme Equação 5.3.

$$F_{\text{calc}} = s_1^2 / s_2^2 \quad (5.3)$$

Onde:

- a) “ F_{calc} ” é o valor do teste de Fischer;
- b) “ s_1^2 ” é a variância da amostra 1;

c) “ s_2^2 ” é a variância da amostra 2.

A hipótese nula “ H_0 ” do teste é o suposto que a diferença das variâncias das amostras 1 e 2 não é significativa. Então se $F_{\text{calc}} < F_{\text{tab}}$ se rejeita a hipótese nula, isto é, considera-se que a diferença das variâncias das amostras 1 e 2 é significativa. Isto é uma condição para fazer o contraste das médias das amostras 1 e 2. Uma comprovação equivalente pode ser feita por meio do valor p da probabilidade correspondente ao valor “ F_{calc} ”, se o valor $p < 0,05$ se rejeita a hipótese nula.

5.3.1.3 Teste “ t ” de diferenças entre as médias

A fase a seguir é a comprovação das diferenças entre as médias. Isto foi feito pelo teste de Student (teste “ t ”) com um nível de significância de 5 % para todas as amostras. Neste caso, a hipótese nula “ H_0 ” do teste é o suposto que a diferença das médias das amostras 1 e 2 não é significativa. O teste é feito pela comparação do valor “ t ” tabelado para com um nível de significância de 5 % e o valor “ t ” é calculado pela seguinte Equação 5.4, onde o estatístico tem uma distribuição de Student com “ ν ” graus de liberdade, conforme apresentado na Equação 5.5.

$$t_{\text{calc}} = (\bar{X}_1 - \bar{X}_2) / \sqrt{(s_1^2/n_1) + (s_2^2/n_2)} \quad (5.4)$$

$$\nu = [(s_1^2/n_1) + (s_2^2/n_2)]^2 / \{[(s_1^2/n_1)^2/(n_1 - 1)] + [(s_2^2/n_2)^2/(n_2 - 1)]\} \quad (5.5)$$

Onde:

- a) “ t_{calc} ” é o valor do teste de Student calculado;
- b) “ \bar{X}_1 ” é a média da amostra 1;
- c) “ \bar{X}_2 ” é a média da amostra 2;
- d) “ s_1 ” é o desvio padrão da amostra 1;
- e) “ n_1 ” é o tamanho da amostra 1;
- f) “ s_2 ” é o desvio padrão da amostra 2;
- g) “ n_2 ” é o tamanho da amostra 2;
- h) “ ν ” é a quantidade de graus de liberdade da distribuição de Student.

A hipótese nula “ H_0 ” do teste é o suposto que a diferença das médias das amostras 1 e 2 não é significativa. Então se $t_{\text{calc}} < t_{\text{tab}}$ se rejeita a hipótese nula, isto é, considera-se que a diferença das médias das amostras 1 e 2 é significativa. Isto é uma condição para definir relações entre as médias das amostras. Uma comprovação equivalente pode ser feita por meio do valor “ p ” de probabilidade correspondente ao valor “ t_{calc} ”, se o valor $p < 0,05$ se rejeita a hipótese nula.

5.3.2 Resultados da Análise Estatística

A seguir, apresenta-se um resumo dos dados obtidos em cada concretagem nesta etapa experimental:

- a) resistência à compressão simples de corpos de prova moldados (CPs),
 - com cura no ar;
 - com cura úmida;
- b) resistência à compressão de testemunhos extraídos dos painéis (T),
 - com cura no ar;
 - com cura úmida;
- c) tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT,
 - com cura no ar;
 - com cura úmida;
- d) tensão máxima de aderência em painéis SBPULOT,
 - ensaios SBPULOT com cura pela aspersão;
 - ensaios SBPULOT com cura úmida permanente;
- e) contrastes de variâncias e médias das amostras;
- f) análise de correlação simples;
- g) medições de maturidade em painéis,
 - com cura pela aspersão;
 - com cura úmida;
- h) medições de velocidade de vento e de temperatura ambiente.

Os resultados foram classificados por cada concretagem e por cada tipo de ensaio. Cada grupo de ensaios foi distribuído em lotes de acordo com seu tipo de cura. A análise foi feita por meio do *software* STATÍSTICA, de versão 12, e planilhas eletrônicas do Microsoft Office Excel.

A seguir apresenta-se a análise estatística da totalidade dos resultados dos ensaios realizados no Concretagem 1. Os APÊNDICES A a F apresentam os detalhes completos das análises de todos os resultados das concretagens.

5.3.2.1 Resistência à compressão simples de corpos de prova moldados

Cada uma das amostras foi submetida ao teste de normalidade para eliminar os valores *outliers*, segundo o que foi explicado no item 5.3.1.1. Os dados de resistência individuais foram tratados conforme ao critério descrito na NBR 5739:2007 (ABNT, 2007a) para obter os valores representativos de cada amostra de acordo com sua idade e seu tipo de cura. O valor que representa a amostra é a média aritmética dos exemplares.

Também foi feita a avaliação de desempenho do ensaio conforme ao Anexo B da NBR 5739:2007 (ABNT, 2007a). Isto foi feito para avaliar os resultados obtidos quanto a sua dispersão devida às operações de ensaio. A análise é feita a partir das amplitudes de valores de resistência. A amplitude é a diferença entre o maior e o menor valor dos corpos de prova de cada exemplar.

O desvio padrão dentro do ensaio é calculado com a seguinte Equação 5.5. Esse desvio padrão é dividido pela resistência média dos corpos de prova para determinar o coeficiente de variação dentro do ensaio, conforme Equação 5.6.

$$s_e = \sum A_i / (d_2 * N) \quad (5.5)$$

$$cv_e = s_e / f_{cm} \quad (5.6)$$

Onde:

- a) “ s_e ” é o desvio padrão dentro do ensaio;
- b) “ A_i ” é a amplitude de cada exemplar;

- c) “ d_2 ” é o coeficiente fornecido da Tabela B.1 da NBR 5739:2007 (ABNT, 2007a) em função da quantidade dos corpos de prova;
- d) “N” é o número de exemplares da amostra;
- e) “ cv_e ” é o coeficiente de variação dentro do ensaio;
- f) “ f_{cm} ” é a resistência à compressão média dos corpos de prova.

O coeficiente de variação dentro do ensaio qualifica a eficiência das operações de ensaio por meio da classificação da Tabela B-2, que se reproduz a seguir na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Avaliação do ensaio através do coeficiente de variação dentro do ensaio

Coeficiente de variação dentro do ensaio cv_e				
Nível 1 Excelente	Nível 2 Muito bom	Nível 3 Bom	Nível 4 Razoável	Nível 5 Deficiente
$cv_e \leq 3,0$	$3,0 < cv_e \leq 4,0$	$4,0 < cv_e \leq 5,0$	$5,0 < cv_e \leq 6,0$	$cv_e > 6,0$

(fonte: ABNT, 2007)

Nas seguintes tabelas, apresentam-se os valores obtidos e as análises realizadas após ensaios de resistência à compressão simples realizados em corpos de prova da Concretagem 1. Desse modo, as Tabela 5.13, Tabela 5.14, Tabela 5.15 e Tabela 5.16 são referentes a esses resultados obtidos, respectivamente, aos 3, 5, 7 e 28 dias. Na sequência, registra-se a Tabela 5.17 com o resumo desses resultados para curas úmida e no ambiente.

Tabela 5.13 – Análise de valores de resistência à compressão simples de corpos de prova – 3 dias Concretagem 1.

**ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLE CPs
CONCRETAGEM 01**

Referências

CU: Cura úmida

CA: Cura no ambiente

\bar{X} : valor médio (MPa)

s: desvio padrão (MPa)

cv: coeficiente de variação

s_e : desvio do ensaio (MPa)

cv_e : coeficiente de variação do ensaio

$f_{c,est,CPs}$: resistência estimada a partir dos CPs (MPa)

T_1 : parâmetro superior

T_2 : parâmetro inferior

$t_{1\%}$: parâmetro de comparação ao nível 1% (ASTM E178-08)

Código CPs	Idade (dias)	Carga kg	Área CPs cm ²	Altura CPs cm	Diâmetro (d) CPs cm	h/d	Fator de correção	Pressão máxima corrigida MPa	Amplitude dos exemplares MPa	Resistência dos exemplares MPa	Parâmetros estatísticos			
											CA - 3 dias		CU - 3 dias	
CI 19-07 CA CP1	3	19.845	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	25,0	0,40	25,4	\bar{X} = 23,7	Avaliação do desempenho do ensaio		
CI 19-07 CA CP2	3	20.128	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	25,4	0,10	23,0	s = 1,24	s_e = 0,69		
CI 19-07 CA CP3	3	18.238	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	23,0	0,10	23,0	cv = 5,25%	cv_e = 2,93%		
CI 19-07 CA CP4	3	18.195	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	22,9	0,10	23,0	Teste de normalidade			
CI 19-07 CA CP5	3	18.763	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	23,7	1,60	25,3	T_1 = 1,37			
CI 19-07 CA CP6	3	20.086	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	25,3	1,60	25,3	T_2 = 1,36			
CI 19-07 CA CP7	3	19.992	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	25,2	2,10	25,2	$t_{1\%}$ = 2,64			
CI 19-07 CA CP8	3	18.306	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	23,1	0,00	22,0	Parâmetros			
CI 19-07 CA CP9	3	17.409	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	22,0	0,00	22,0	Comprovação			
CI 19-07 CA CP10	3	17.409	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	22,0	0,00	22,0	$T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores			
CI 19-07 CA CP11	3	18.746	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	23,6	0,50	23,6	Estimativa da resistência			
CI 19-07 CA CP12	3	18.306	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	23,1	0,50	23,6	$f_{c,est,CPs} = 22,0$			
CI 19-07 CU CP1	3	20.291	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	25,6	0,30	25,6	CU - 3 dias			
CI 19-07 CU CP2	3	20.080	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	25,3	0,30	25,6	Avaliação do desempenho do ensaio			
CI 19-07 CU CP3	3	19.742	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	24,9	1,50	26,4	\bar{X} = 26,2			
CI 19-07 CU CP4	3	20.936	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	26,4	1,50	26,4	s = 0,81	s_e = 0,75		
CI 19-07 CU CP5	3	20.853	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	26,3	0,60	26,3	cv = 3,11%	cv_e = 2,87%		
CI 19-07 CU CP6	3	20.343	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	25,7	0,60	26,3	Teste de normalidade			
CI 19-07 CU CP7	3	21.438	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	27,0	0,90	27,0	T_1 = 1,44			
CI 19-07 CU CP8	3	20.674	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	26,1	0,90	27,0	T_2 = 1,63			
CI 19-07 CU CP9	3	20.375	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	25,7	1,50	27,2	$t_{1\%}$ = 2,64			
CI 19-07 CU CP10	3	21.593	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	27,2	1,50	27,2	$T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores			
CI 19-07 CU CP11	3	21.722	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	27,4	0,30	27,4	Estimativa da resistência			
CI 19-07 CU CP12	3	21.522	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	27,1	0,30	27,4	$f_{c,est,CPs} = 24,9$			

Tabela 5.14 – Análise de valores de resistência à compressão simples de corpos de prova- 5 dias Concretagem 1.

**ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLE CPs
CONCRETAGEM 01**

Referências

CU: Cura úmida
CA: Cura no ambiente
 \bar{X} : valor médio (MPa)
s: desvio padrão (MPa)
cv: coeficiente de variação

s_e : desvio do ensaio (MPa)
 cv_e : coeficiente de variação do ensaio
 $f_{c,est,eps}$: resistência estimada a partir dos CPs (MPa)

T_1 : parâmetro superior
 T_2 : parâmetro inferior
 $t_{1\%}$: parâmetro de comparação ao nível 1% (ASTM E178-08)

Código CPs	Idade (dias)	Carga kg	Área CPs cm ²	Altura (h) CPs cm	Diâmetro (d) CPs cm	Fator de correção (h/d)	Pressão máxima corrigida MPa	Amplitude dos exemplares MPa	Resistência dos exemplares MPa	Parâmetros estatísticos	
										CA - 5 dias	Teste de normalidade
CI 19-07 CA CP13	5	22.711	77,8	19,9	9,95	2,00	28,6	1,70	30,3	\bar{X} = 27,4	Avaliação do desempenho do ensaio
CI 19-07 CA CP14	5	24.010	77,8	19,9	9,95	2,00	30,3	1,00	27,2	s = 1,28	s_e = 0,96
CI 19-07 CA CP15	5	21.560	77,8	19,9	9,95	2,00	27,2	1,00	26,2	cv = 4,67%	cv_e = 3,50%
CI 19-07 CA CP16	5	20.804	77,8	19,9	9,95	2,00	26,2	0,80	26,3	Teste de normalidade	
CI 19-07 CA CP17	5	20.253	77,8	19,9	9,95	2,00	25,5	1,10	27,9	$T_1 = 2,23$	
CI 19-07 CA CP18	5	20.886	77,8	19,9	9,95	2,00	26,3	0,50	27,8	$T_2 = 1,51$	
CI 19-07 CA CP19	5	21.226	77,8	19,9	9,95	2,00	26,8	1,40	28,4	$t_{1\%} = 2,64$	
CI 19-07 CA CP20	5	22.129	77,8	19,9	9,95	2,00	27,9	0,70	31,9	Não se descartam valores	
CI 19-07 CA CP21	5	21.629	77,8	19,9	9,95	2,00	27,3	1,10	29,9	$f_{c,est,eps} = 25,5$	
CI 19-07 CA CP22	5	22.031	77,8	19,9	9,95	2,00	27,8	1,20	33,6	CU - 5 dias	
CI 19-07 CA CP23	5	22.494	77,8	19,9	9,95	2,00	28,4	0,00	31,9	Avaliação do desempenho do ensaio	
CI 19-07 CA CP24	5	21.397	77,8	19,9	9,95	2,00	27,0	1,10	29,9	s = 1,34	s_e = 0,96
CI 19-07 CU CP13	5	24.703	77,8	19,9	9,95	2,00	31,2	1,20	33,6	cv = 4,30%	cv_e = 3,07%
CI 19-07 CU CP14	5	25.295	77,8	19,9	9,95	2,00	31,9	0,00	31,9	Teste de normalidade	
CI 19-07 CU CP15	5	22.848	77,8	19,9	9,95	2,00	28,8	1,30	31,4	$T_1 = 1,74$	
CI 19-07 CU CP16	5	23.701	77,8	19,9	9,95	2,00	29,9	0,00	31,9	$T_2 = 1,83$	
CI 19-07 CU CP17	5	26.633	77,8	19,9	9,95	2,00	33,6	1,30	31,4	$t_{1\%} = 2,64$	
CI 19-07 CU CP18	5	25.680	77,8	19,9	9,95	2,00	32,4	1,30	30,1	Não se descartam valores	
CI 19-07 CU CP19	5	25.273	77,8	19,9	9,95	2,00	31,9	2,20	32,1	$f_{c,est,eps} = 28,8$	
CI 19-07 CU CP20	5	25.306	77,8	19,9	9,95	2,00	31,9	1,30	31,4		
CI 19-07 CU CP21	5	24.894	77,8	19,9	9,95	2,00	31,4	2,20	32,1		
CI 19-07 CU CP22	5	23.828	77,8	19,9	9,95	2,00	30,1	2,20	32,1		
CI 19-07 CU CP23	5	23.694	77,8	19,9	9,95	2,00	29,9	2,20	32,1		
CI 19-07 CU CP24	5	25.466	77,8	19,9	9,95	2,00	32,1	2,20	32,1		

Tabela 5.15 – Análise de valores de resistência à compressão simples de corpos de prova - 7 dias Concretagem 1.

**ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLE CPs
CONCRETAGEM 01**

Referências

CU: Cura úmida

CA: Cura no ambiente

\bar{X} : valor médio (MPa)

s: desvio padrão (MPa)

cv: coeficiente de variação

s_e : desvio do ensaio (MPa)

cv_e : coeficiente de variação do ensaio

$f_{c,est,CPs}$: resistência estimada a partir dos CPs (MPa)

T_1 : parâmetro superior

T_2 : parâmetro inferior

$t_{1\%}$: parâmetro de comparação ao nível 1% (ASTM E178-08)

Código CPs	Idade (dias)	Carga kg	Área CPs cm ²	Altura (h) CPs cm	Diâmetro (d) CPs cm	(h/d)	Fator de correção	Pressão máxima corrigida MPa	Amplitude dos exemplares MPa	Resistência dos exemplares MPa	Parâmetros estatísticos			
											CA - 7 dias			
C1 19-07 CA CP25	7	24.863	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	31,4	2,80	31,4	Avaliação do desempenho do ensaio			
C1 19-07 CA CP26	7	22.653	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	28,6			\bar{X} = 29,0	s_e = 1,16	cv_e = 4,00%	0,71
C1 19-07 CA CP27	7	23.584	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	29,7	1,00	30,7				2,45%
C1 19-07 CA CP28	7	24.309	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	30,7			Teste de normalidade			
C1 19-07 CA CP29	7	21.893	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	27,6	0,20	27,6	T_1 = 2,12			
C1 19-07 CA CP30	7	21.738	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	27,4			T_2 = 1,34			
C1 19-07 CA CP31	7	23.090	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	29,1	0,70	29,1	$t_{1\%}$ = 2,64			
C1 19-07 CA CP32	7	22.490	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	28,4			Não se descartam valores			
C1 19-07 CA CP33	7	22.763	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	28,7	0,00	28,7	$T_1 < t_{1\%}$			
C1 19-07 CA CP34	7	22.742	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	28,7			$T_2 < t_{1\%}$			
C1 19-07 CA CP35	7	22.687	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	28,6			Estimativa da resistência			
C1 19-07 CA CP36	7	22.571	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	28,5	0,10	28,6	$f_{c,est,CPs}$ = 27,4			
C1 19-07 CU CP25	7	21.925	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	27,7			CU - 7 dias			
C1 19-07 CU CP26	7	24.454	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	30,8	3,10	30,8	\bar{X} = 31,5	Avaliação do desempenho do ensaio		
C1 19-07 CU CP27	7	24.827	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	31,3			s_e = 1,39	cv_e = 4,42%	1,05	3,33%
C1 19-07 CU CP28	7	25.308	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	31,9	0,60	31,9	Teste de normalidade			
C1 19-07 CU CP29	7	25.716	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	32,4	0,70	33,1	T_1 = 1,14			
C1 19-07 CU CP30	7	26.279	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	33,1			T_2 = 2,73			
C1 19-07 CU CP31	7	24.959	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	31,5	0,30	31,5	$t_{1\%}$ = 2,64			
C1 19-07 CU CP32	7	24.720	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	31,7			Não se descartam valores			
C1 19-07 CU CP33	7	25.163	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	31,2	1,00	32,7	$T_1 < t_{1\%}$			
C1 19-07 CU CP34	7	25.942	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	32,7			$T_2 < t_{1\%}$			
C1 19-07 CU CP35	7	25.838	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	32,6	1,40	32,6	Estimativa da resistência			
C1 19-07 CU CP36	7	24.734	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	31,2			$f_{c,est,CPs}$ = 27,7			

Tabela 5.16 – Análise de valores de resistência à compressão simples de corpos de prova – 28 dias Concretagem 1.

**ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLE CPs
CONCRETAGEM 01**

Referências

CU: Cura úmida

CA: Cura no ambiente

\bar{X} : valor médio (MPa)

s: desvio padrão (MPa)

cv: coeficiente de variação

s_e : desvio do ensaio (MPa)

cv_e : coeficiente de variação do ensaio

$f_{c,est,eps}$: resistência estimada a partir dos CPs (MPa)

T_1 : parâmetro superior

T_2 : parâmetro inferior

$t_{1\%}$: parâmetro de comparação ao nível 1% (ASTM E178-08)

Código CPs	Idade (dias)	Carga kg	Área CPs cm ²	Altura (h) CPs cm	Diâmetro (d) CPs cm	(b/d)	Fator de correção	Pressão máxima corrigida MPa	Amplitude dos exemplares MPa	Resistência dos exemplares MPa	Parâmetros estatísticos	
											CA - 28 dias	CU - 28 dias
CI 19-07 CA CP37	28	27.582	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	34,8	0,20	34,8	\bar{X} = 32,4	Avaliação do desempenho do ensaio
CI 19-07 CA CP38	28	27.421	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	34,6	0,20	34,8	s= 1,85	s_e = 0,18
CI 19-07 CA CP39	28	24.458	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	30,8	0,30	30,8	cv= 5,71%	cv _e = 0,55%
CI 19-07 CA CP40	28	24.191	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	30,5	0,30	30,8		
CI 19-07 CA CP41	28	25.333	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	32,0	0,10	32,0		Teste de normalidade
CI 19-07 CA CP42	28	25.265	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	31,9	0,10	32,0	T_1 = 1,28	
CI 19-07 CU CP37	28	30.903	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	39,0	0,40	39,4	T_2 = 1,04	
CI 19-07 CU CP38	28	31.201	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	39,4	0,40	39,4	$t_{1\%}$ = 1,97	
CI 19-07 CU CP39	28	31.590	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	39,8	2,30	42,1	$T_1 < t_{1\%}$	Parâmetros
CI 19-07 CU CP40	28	33.347	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	42,1	2,30	42,1	$T_2 < t_{1\%}$	Comprovação
CI 19-07 CU CP41	28	30.255	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	38,2	1,00	38,2		Estimativa da resistência
CI 19-07 CU CP42	28	29.522	77,8	19,9	9,95	2,00	1,00	37,2	1,00	38,2	$f_{c,est,eps}$ = 30,5	
											CU - 28 dias	
											\bar{X} = 39,3	Avaliação do desempenho do ensaio
											s= 1,66	s_e = 1,09
											cv= 4,23%	cv _e = 2,78%
											Teste de normalidade	
											T_1 = 1,69	
											T_2 = 1,25	
											$t_{1\%}$ = 1,97	
											$T_1 < t_{1\%}$	Parâmetros
											$T_2 < t_{1\%}$	Comprovação
											$f_{c,est,eps}$ = 37,2	Estimativa da resistência

Tabela 5.17 – Resumo de valores de resistência à compressão simples de corpos de prova da Concretagem 1

Idade	Lote	Resistência CPs (MPa)
3 dias	CU	24,9
	CA	22,0
5 dias	CU	28,8
	CA	25,5
7 dias	CU	27,7
	CA	27,4
28 dias	CU	37,2
	CA	30,5

Os valores de resistência à compressão simples nos corpos de prova cilíndricos mostram uma tendência crescente entre os 3 e os 28 dias com um valor estimado de 38,2 MPa aos 28 dias nos espécimes com cura úmida. Os coeficientes de variação dentro do ensaio indicam valores entre níveis 1 e 2, ou melhor, “Excelente” e “Muito Bom”. Os resultados obtidos em corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm de todos os concretagens feitos são detalhados nos APÊNDICES A a F.

5.3.2.2 Resistência à compressão simples de testemunhos extraídos dos painéis

Da mesma forma que com os corpos de prova do item anterior, cada grupo de valores de resistência à compressão simples dos testemunhos correspondente a um painel foi submetido ao teste de normalidade para eliminar os valores *outliers* segundo o explicado no item 5.3.1.1.

Os dados de resistência à compressão simples individuais foram tratados conforme o critério descrito na NBR 7680-1:2015 (ABNT, 2015e) para obter os valores representativos de cada um desses quatro painéis, nomeados com as letras A, B, C e D, em que o primeiro foi com cura úmida, e os demais, com cura pela aspersão. Previamente foram eliminados os valores que apresentaram uma divergência relativa à média superior a 15 %. Além disso, quando houve mais de um painel com cura no ar (CA) ou com cura úmida (CU), os resultados foram associados a um único valor que representou o lote em questão. A Tabela 5.28 apresenta o resumo dos resultados obtidos dos testemunhos extraídos dos painéis da Concretagem 1 aos 3 dias.

Tabela 5.18 – Resumo de valores de resistência à compressão simples de testemunhos extraídos -3 dias Concretagem 1.

Concretagem 1	Painel A ₁ (CU)	Painel B (CA)	Painel C (CA)	Painel D (CA)
	Tipo de cura	Cura úmida	Cura pela aspersão	
Painéis	A	B	C	D
Resistência à compressão simples individuais de testemunhos (MPa)	30,5	24,7	27,7	25,0
	27,1	21,8	27,1	24,9
	27,6	23,4	23,7	26,2
	29,8	28,4	25,4	25,1
	29,6	26,3	24,5	23,5
	26,8	25,8	28,2	28,3
Resistência à compressão simples do painel (MPa)	28,6	25,1	26,1	25,5
Resistência à compressão simples de lotes (MPa)	28,6	25,6		

Nas seguintes tabelas, apresentam-se os valores obtidos e as análises realizadas após ensaios de resistência à compressão simples realizados em testemunhos extraídos de painéis da Concretagem 1. Desse modo, as Tabela 5.19, Tabela 5.20, Tabela 5.21, Tabela 5.22, Tabela 5.23, Tabela 5.24, Tabela 5.25 e Tabela 5.26 são referentes a esses resultados obtidos, respectivamente, aos 3, 3, 5, 5, 7, 7, 28 e 28 dias, sendo que a segunda tabela de cada dia apresenta os parâmetros estatísticos calculados. Na sequência, registra-se a Tabela 5.27 com o resumo desses resultados para curas no ar e pela aspersão.

Tabela 5.19 – Análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos extraídos - 3 dias Concretagem 1.

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLE EM TESTEMUNHOS
CONCRETAGEM 01
VERIFICACIÓN Y CONFORMACIÓN DE LOTES

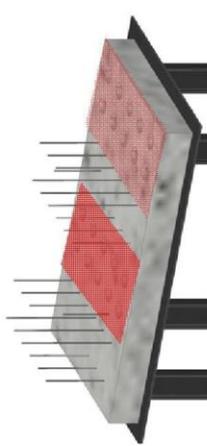
Referências

CU: Cura úmida

CA: Cura pela aspersão

Fator de correção (ABNT NBR 7680-1:2015)

$k=1+(k_1+k_2+k_3+k_4)$



Código testemunho	Idade (dias)	Carga máxima kg	Área cm ²	Altura (h) cm	Diâmetro (d) cm	(h/d)	Fatores de correção				Resistência corrigida MPa
							k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	
C1 19-07 CU T3A1	3	19,908	67,2	17,6	9,25	1,90	-0,01	0,06	0,00	1,05	30,5
C1 19-07 CU T3A2	3	17,672	67,2	17,9	9,25	1,93	-0,01	0,06	0,00	1,05	27,1
C1 19-07 CU T3A3	3	18,036	67,2	17,7	9,25	1,91	-0,01	0,06	0,00	1,05	27,6
C1 19-07 CU T3A4	3	19,432	67,2	17,9	9,25	1,94	-0,01	0,06	0,00	1,05	29,8
C1 19-07 CU T3A5	3	19,342	67,2	17,9	9,25	1,94	-0,01	0,06	0,00	1,05	29,6
C1 19-07 CU T3A6	3	17,469	67,2	17,8	9,25	1,92	-0,01	0,06	0,00	1,05	26,8
C1 19-07 CA T3B1	3	16,135	67,2	17,7	9,25	1,91	-0,01	0,06	0,00	1,05	24,7
C1 19-07 CA T3B2	3	14,243	67,2	17,9	9,25	1,94	-0,01	0,06	0,00	1,05	21,8
C1 19-07 CA T3B3	3	15,249	67,2	17,9	9,25	1,93	-0,01	0,06	0,00	1,05	23,4
C1 19-07 CA T3B4	3	18,518	67,2	17,7	9,25	1,91	-0,01	0,06	0,00	1,05	28,4
C1 19-07 CA T3B5	3	17,180	67,2	17,9	9,25	1,94	-0,01	0,06	0,00	1,05	26,3
C1 19-07 CA T3B6	3	16,831	67,2	17,9	9,25	1,94	-0,01	0,06	0,00	1,05	25,8
C1 19-07 CA T3C1	3	18,064	67,1	18,0	9,24	1,94	-0,01	0,06	0,00	1,05	27,7
C1 19-07 CA T3C2	3	17,640	67,1	17,8	9,24	1,92	-0,01	0,06	0,00	1,05	27,1
C1 19-07 CA T3C3	3	15,312	67,1	18,1	9,24	1,96	0,00	0,06	0,00	1,06	23,7
C1 19-07 CA T3C4	3	16,517	67,1	17,9	9,24	1,94	-0,01	0,06	0,00	1,05	25,4
C1 19-07 CA T3C5	3	15,966	67,1	17,9	9,24	1,94	-0,01	0,06	0,00	1,05	24,5
C1 19-07 CA T3C6	3	18,217	67,1	18,1	9,24	1,96	0,00	0,06	0,00	1,06	28,2
C1 19-07 CA T3D1	3	16,518	67,9	17,8	9,30	1,91	-0,01	0,06	0,00	1,05	25,0
C1 19-07 CA T3D2	3	16,406	67,9	17,8	9,30	1,91	-0,01	0,06	0,00	1,05	24,9
C1 19-07 CA T3D3	3	17,304	67,9	18,0	9,30	1,94	-0,01	0,06	0,00	1,05	26,2
C1 19-07 CA T3D4	3	16,396	67,9	18,1	9,30	1,95	0,00	0,06	0,00	1,06	25,1
C1 19-07 CA T3D5	3	15,491	67,9	17,7	9,30	1,90	-0,01	0,06	0,00	1,05	23,5
C1 19-07 CA T3D6	3	18,682	67,9	18,0	9,30	1,94	-0,01	0,06	0,00	1,05	28,3

Tabela 5.20 – Parâmetros estatísticos da análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos - 3 dias Concretagem 1.

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLE EM TESTEMUNHOS
CONCRETAGEM 01
VERIFICAÇÃO Y CONFORMAÇÃO DE LOTES

Referências

CU: Cura úmida
CA: Cura pela aspersão
 $f_{c,est.1}$: resistência estimada dos testemunhos (MPa)
 \bar{X} : valor médio (MPa)
s: desvio padrão (MPa)

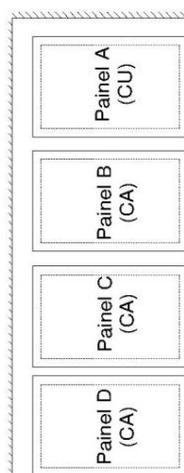
cv: coeficiente de variação

Divergência = $(f_{c,i} - f_{c,est.1}) \cdot 100 / f_{c,est.1}$

T_1 : parâmetro superior

T_2 : parâmetro inferior

$t_{1\%}$: parâmetro de comparação ao nível 1% (ASTM E178-08)



Código testemunho	Idade (dias)	Divergência (%)	Parâmetros estatísticos painéis			Parâmetros estatísticos lotes		
			Painel A (CU) - 3 dias	Painel B (CA) - 3 dias	CU (Painel A) - 3 dias	Parâmetros	Comprovação	Teste de normalidade
CI 19-07 CU T3A1	3	6.8%	$\bar{X}=28.6$ $s=1.58$ $cv=5.54\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.22$ $T_2 = 1.12$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	$\bar{X}=25.1$ $s=2.31$ $cv=9.23\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.44$ $T_2 = 1.41$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	$\bar{X}=28.6$ $s=1.58$ $cv=5.54\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.22$ $T_2 = 1.12$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	Parâmetros $T_1 = 1.22$ $T_2 = 1.12$ $t_{1\%} = 1.97$ Comprovação	CU (Painel A) - 3 dias $\bar{X}=28.6$ $s=1.58$ $cv=5.54\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.22$ $T_2 = 1.12$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	
CI 19-07 CU T3A2	3	-5.1%						
CI 19-07 CU T3A3	3	-3.4%						
CI 19-07 CU T3A4	3	4.3%						
CI 19-07 CU T3A5	3	3.6%						
CI 19-07 CU T3A6	3	-6.2%	$\bar{X}=26.1$ $s=1.83$ $cv=7.02\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.15$ $T_2 = 1.31$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	$\bar{X}=25.5$ $s=1.62$ $cv=6.35\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.73$ $T_2 = 1.24$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	$\bar{X}=25.6$ $s=1.88$ $cv=7.34\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.52$ $T_2 = 2.00$ $t_{1\%} = 2.93$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	Parâmetros $T_1 = 1.15$ $T_2 = 1.31$ $t_{1\%} = 1.97$ Comprovação	CA (Painéis B, C y D) - 3 dias $\bar{X}=25.6$ $s=1.88$ $cv=7.34\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.52$ $T_2 = 2.00$ $t_{1\%} = 2.93$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	
CI 19-07 CA T3B1	3	-1.5%						
CI 19-07 CA T3B2	3	-13.0%						
CI 19-07 CA T3B3	3	-6.6%						
CI 19-07 CA T3B4	3	13.3%						
CI 19-07 CA T3B5	3	4.9%	$\bar{X}=26.1$ $s=1.83$ $cv=7.02\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.15$ $T_2 = 1.31$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	$\bar{X}=25.5$ $s=1.62$ $cv=6.35\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.73$ $T_2 = 1.24$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	$\bar{X}=25.6$ $s=1.88$ $cv=7.34\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.52$ $T_2 = 2.00$ $t_{1\%} = 2.93$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	Parâmetros $T_1 = 1.15$ $T_2 = 1.31$ $t_{1\%} = 1.97$ Comprovação	CA (Painéis B, C y D) - 3 dias $\bar{X}=25.6$ $s=1.88$ $cv=7.34\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.52$ $T_2 = 2.00$ $t_{1\%} = 2.93$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	
CI 19-07 CA T3B6	3	2.9%						
CI 19-07 CA T3C1	3	6.1%						
CI 19-07 CA T3C2	3	3.8%						
CI 19-07 CA T3C3	3	-9.2%						
CI 19-07 CA T3C4	3	-2.7%	$\bar{X}=26.1$ $s=1.83$ $cv=7.02\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.15$ $T_2 = 1.31$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	$\bar{X}=25.5$ $s=1.62$ $cv=6.35\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.73$ $T_2 = 1.24$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	$\bar{X}=25.6$ $s=1.88$ $cv=7.34\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.52$ $T_2 = 2.00$ $t_{1\%} = 2.93$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	Parâmetros $T_1 = 1.15$ $T_2 = 1.31$ $t_{1\%} = 1.97$ Comprovação	CA (Painéis B, C y D) - 3 dias $\bar{X}=25.6$ $s=1.88$ $cv=7.34\%$ Teste de normalidade $T_1 = 1.52$ $T_2 = 2.00$ $t_{1\%} = 2.93$ $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$	
CI 19-07 CA T3D5	3	-1.6%						
CI 19-07 CA T3D6	3	11.0%						

(¹) Os valores dos ensaios que apresentaram divergências maiores que 15% foram descartados do análise estatística, conforme ao critério da norma ABNT NBR 7680-1:2015.

Tabela 5.21 – Análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos - 5 dias Concretagem 1.

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLE EM TESTEMUNHOS
CONCRETAGEM 01
VERIFICAÇÃO Y CONFORMAÇÃO DE LOTES

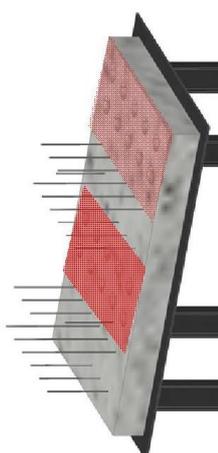
Referências

CU: Cura úmida

Fator de correção (ABNT NBR 7680-1:2015)

CA: Cura pela aspersão

$k=1+(k_1+k_2+k_3+k_4)$



Código testemunho	Idade (dias)	Carga máxima kg	Área cm ²	Altura (h) cm	Diâmetro (d) cm	(h/d)	Fatores de correção				Resistência corrigida MPa
							k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	
CI 19-07 CU T5A1	5	18,531	67.4	17.7	9.26	1.91	-0.01	0.06	0.00	1.05	28.3
CI 19-07 CU T5A2	5	17,864	68.4	17.9	9.33	1.92	-0.01	0.06	0.00	1.05	26.9
CI 19-07 CU T5A3	5	18,315	67.7	17.9	9.28	1.93	-0.01	0.06	0.00	1.05	27.9
CI 19-07 CU T5A4	5	18,356	68.2	17.9	9.32	1.92	-0.01	0.06	0.00	1.05	27.7
CI 19-07 CU T5A5	5	17,205	68.3	18.1	9.33	1.94	-0.01	0.06	0.00	1.05	25.9
CI 19-07 CU T5A6	5	17,426	68.2	18.2	9.32	1.95	0.00	0.06	0.00	1.06	26.6
CI 19-07 CA T5B1	5	16,028	67.9	18.0	9.30	1.94	-0.01	0.06	0.00	1.05	24.3
CI 19-07 CA T5B2	5	17,328	67.3	18.2	9.26	1.97	0.00	0.06	0.00	1.06	26.8
CI 19-07 CA T5B3	5	14,011	68.4	18.1	9.33	1.94	-0.01	0.06	0.00	1.05	21.1
CI 19-07 CA T5B4	5	15,533	68.5	17.8	9.34	1.91	-0.01	0.06	0.00	1.05	23.3
CI 19-07 CA T5B5	5	16,495	68.4	18.2	9.33	1.95	0.00	0.06	0.00	1.06	25.1
CI 19-07 CA T5B6	5	15,640	68.5	17.9	9.34	1.92	-0.01	0.06	0.00	1.05	23.5
CI 19-07 CA T5C1	5	17,115	67.9	18.0	9.30	1.94	-0.01	0.06	0.00	1.05	25.9
CI 19-07 CA T5C2	5	18,531	68.0	18.0	9.31	1.93	-0.01	0.06	0.00	1.05	28.1
CI 19-07 CA T5C3	5	18,408	68.4	17.9	9.34	1.92	-0.01	0.06	0.00	1.05	27.7
CI 19-07 CA T5C4	5	20,019	68.2	18.0	9.32	1.93	-0.01	0.06	0.00	1.05	30.2
CI 19-07 CA T5C5	5	17,288	67.3	18.1	9.25	1.96	0.00	0.06	0.00	1.06	26.7
CI 19-07 CA T5C6	5	17,453	68.4	18.0	9.33	1.93	-0.01	0.06	0.00	1.05	26.3
CI 19-07 CA T5D1	5	16,997	68.7	18.0	9.35	1.92	-0.01	0.06	0.00	1.05	25.5
CI 19-07 CA T5D2	5	16,398	68.7	17.9	9.36	1.91	-0.01	0.06	0.00	1.05	24.6
CI 19-07 CA T5D3	5	16,324	68.2	17.6	9.32	1.89	-0.01	0.06	0.00	1.05	24.6
CI 19-07 CA T5D4	5	17,728	68.2	18.0	9.32	1.93	-0.01	0.06	0.00	1.05	26.8
CI 19-07 CA T5D5	5	18,607	68.8	18.1	9.36	1.93	-0.01	0.06	0.00	1.05	27.8
CI 19-07 CA T5D6	5	18,634	68.2	18.0	9.32	1.93	-0.01	0.06	0.00	1.05	28.1

Tabela 5.22 – Parâmetros estatísticos da análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos -5 dias Concretagem 1.

Código testemunho	Idade (dias)	Divergência (%)	Parâmetros estatísticos painéis		Parâmetros estatísticos lotes	
			Painel A (CU) - 5 dias	Painel B (CA) - 5 dias	Painel A (CU) - 5 dias	Painel B (CA) - 5 dias
CI 19-07 CU T5A1	5	4.0%	\bar{X} = 27.2 s = 0.90 cv = 3.32% Teste de normalidade $T_1 = 1.20$ $T_2 = 1.46$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	\bar{X} = 24.0 s = 1.91 cv = 7.96% Teste de normalidade $T_1 = 1.46$ $T_2 = 1.53$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	\bar{X} = 27.2 s = 0.90 cv = 3.32% Teste de normalidade $T_1 = 1.20$ $T_2 = 1.46$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	CU (Painel A) - 5 dias
CI 19-07 CU T5A2	5	-1.2%				
CI 19-07 CU T5A3	5	2.5%				
CI 19-07 CU T5A4	5	1.8%	\bar{X} = 27.5 s = 1.57 cv = 5.71% Teste de normalidade $T_1 = 1.73$ $T_2 = 1.01$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	\bar{X} = 26.2 s = 1.56 cv = 5.94% Teste de normalidade $T_1 = 1.20$ $T_2 = 1.05$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	\bar{X} = 25.9 s = 2.17 cv = 8.36% Teste de normalidade $T_1 = 1.98$ $T_2 = 2.22$ $t_{1\%} = 2.93$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	CA (Painéis B, C y D) - 5 dias
CI 19-07 CA T5B1	5	-2.3%				
CI 19-07 CA T5B2	5	11.6%				
CI 19-07 CA T5B3	5	-12.1%	\bar{X} = 27.5 s = 1.57 cv = 5.71% Teste de normalidade $T_1 = 1.73$ $T_2 = 1.01$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	\bar{X} = 26.2 s = 1.56 cv = 5.94% Teste de normalidade $T_1 = 1.20$ $T_2 = 1.05$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	\bar{X} = 25.9 s = 2.17 cv = 8.36% Teste de normalidade $T_1 = 1.98$ $T_2 = 2.22$ $t_{1\%} = 2.93$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	CA (Painéis B, C y D) - 5 dias
CI 19-07 CA T5B4	5	-3.0%				
CI 19-07 CA T5B5	5	4.5%				
CI 19-07 CA T5B6	5	-2.2%	\bar{X} = 27.5 s = 1.57 cv = 5.71% Teste de normalidade $T_1 = 1.73$ $T_2 = 1.01$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	\bar{X} = 26.2 s = 1.56 cv = 5.94% Teste de normalidade $T_1 = 1.20$ $T_2 = 1.05$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	\bar{X} = 25.9 s = 2.17 cv = 8.36% Teste de normalidade $T_1 = 1.98$ $T_2 = 2.22$ $t_{1\%} = 2.93$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	CA (Painéis B, C y D) - 5 dias
CI 19-07 CA T5C1	5	-5.8%				
CI 19-07 CA T5C2	5	2.2%				
CI 19-07 CA T5C3	5	0.8%	\bar{X} = 27.5 s = 1.57 cv = 5.71% Teste de normalidade $T_1 = 1.73$ $T_2 = 1.01$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	\bar{X} = 26.2 s = 1.56 cv = 5.94% Teste de normalidade $T_1 = 1.20$ $T_2 = 1.05$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	\bar{X} = 25.9 s = 2.17 cv = 8.36% Teste de normalidade $T_1 = 1.98$ $T_2 = 2.22$ $t_{1\%} = 2.93$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	CA (Painéis B, C y D) - 5 dias
CI 19-07 CA T5C4	5	9.9%				
CI 19-07 CA T5C5	5	-2.9%				
CI 19-07 CA T5C6	5	-4.3%	\bar{X} = 27.5 s = 1.57 cv = 5.71% Teste de normalidade $T_1 = 1.73$ $T_2 = 1.01$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	\bar{X} = 26.2 s = 1.56 cv = 5.94% Teste de normalidade $T_1 = 1.20$ $T_2 = 1.05$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	\bar{X} = 25.9 s = 2.17 cv = 8.36% Teste de normalidade $T_1 = 1.98$ $T_2 = 2.22$ $t_{1\%} = 2.93$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	CA (Painéis B, C y D) - 5 dias
CI 19-07 CA T5D1	5	-2.8%				
CI 19-07 CA T5D2	5	-6.2%				
CI 19-07 CA T5D3	5	-6.2%	\bar{X} = 27.5 s = 1.57 cv = 5.71% Teste de normalidade $T_1 = 1.73$ $T_2 = 1.01$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	\bar{X} = 26.2 s = 1.56 cv = 5.94% Teste de normalidade $T_1 = 1.20$ $T_2 = 1.05$ $t_{1\%} = 1.97$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	\bar{X} = 25.9 s = 2.17 cv = 8.36% Teste de normalidade $T_1 = 1.98$ $T_2 = 2.22$ $t_{1\%} = 2.93$ $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores	CA (Painéis B, C y D) - 5 dias
CI 19-07 CA T5D4	5	2.2%				
CI 19-07 CA T5D5	5	6.0%				
CI 19-07 CA T5D6	5	7.1%				

(¹) Os valores dos ensaios que apresentaram divergências maiores que 15% foram descartados do análise estatística, conforme ao critério da norma ABNT NBR 7680-1:2015.

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLE EM TESTEMUNHOS
 CONCRETAGEM 01
 VERIFICAÇÃO Y CONFORMAÇÃO DE LOTES

Referências

CU: Cura úmida

CA: Cura pela aspersion

$f_{c,est,1}$: resistência estimada dos
 testemunhos (MPa)

\bar{X} : valor médio (MPa)

s : desvio padrão (MPa)

cv : coeficiente de variação

Divergência = $(f_{c,1} - f_{c,est,1}) \cdot 100 / f_{c,est,1}$

T_1 : parâmetro superior

T_2 : parâmetro inferior

$t_{1\%}$: parâmetro de comparação ao nível 1% (ASTM E178-08)

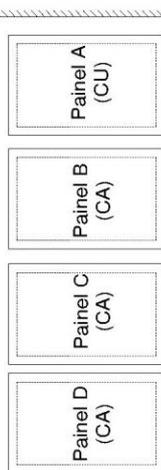


Tabela 5.23 – Análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos -7 dias Concretagem 1.

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLE EM TESTEMUNHOS
CONCRETAGEM 01
VERIFICAÇÃO Y CONFORMAÇÃO DE LOTES

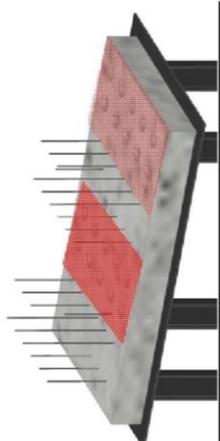
Referências

CU: Cura úmida

CA: Cura pela aspersão

Fator de correção (ABNT NBR 7680-1:2015)

$$k=1+(k_1+k_2+k_3+k_4)$$



Código testemunho	Idade (dias)	Carga máxima kg	Área cm ²	Altura (h) cm	Diâmetro (d) cm	(h/d)	Fatores de correção					Resistência corrigida MPa
							k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k	
CI 19-07 CU T7A1	7	21,153	68,2	17,8	9,32	1,91	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	31,9
CI 19-07 CU T7A2	7	19,574	68,2	17,9	9,32	1,92	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	29,6
CI 19-07 CU T7A3	7	21,147	68,2	17,8	9,32	1,91	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	31,9
CI 19-07 CU T7A4	7	20,356	68,2	17,5	9,32	1,88	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	30,7
CI 19-07 CU T7A5	7	20,398	68,2	17,5	9,32	1,88	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	30,8
CI 19-07 CU T7A6	7	22,603	68,2	17,6	9,32	1,89	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	34,1
CI 19-07 CA T7B1	7	16,418	68,2	17,4	9,32	1,87	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	24,8
CI 19-07 CA T7B2	7	17,616	68,2	17,8	9,32	1,91	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	26,6
CI 19-07 CA T7B3	7	19,730	68,2	17,8	9,32	1,91	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	29,8
CI 19-07 CA T7B4	7	18,853	68,2	17,5	9,32	1,88	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	28,5
CI 19-07 CA T7B5	7	20,400	68,2	17,5	9,32	1,88	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	30,8
CI 19-07 CA T7B6	7	19,567	68,2	17,6	9,32	1,89	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	29,6
CI 19-07 CA T7C1	7	22,006	68,2	18,0	9,32	1,93	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	33,2
CI 19-07 CA T7C2	7	16,662	68,2	17,9	9,32	1,92	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	25,2
CI 19-07 CA T7C3	7	18,110	68,2	18,4	9,32	1,97	0,00	0,06	0,00	0,00	1,06	27,6
CI 19-07 CA T7C4	7	17,182	68,2	17,8	9,32	1,91	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	26,0
CI 19-07 CA T7C5	7	17,545	68,2	17,7	9,32	1,90	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	26,5
CI 19-07 CA T7C6	7	19,754	68,2	17,8	9,32	1,91	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	29,8
CI 19-07 CA T7D1	7	20,591	68,2	17,9	9,32	1,92	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	31,1
CI 19-07 CA T7D2	7	19,414	68,2	17,8	9,32	1,91	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	29,3
CI 19-07 CA T7D3	7	19,352	68,2	17,4	9,32	1,87	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	29,2
CI 19-07 CA T7D4	7	19,589	68,2	17,4	9,32	1,87	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	29,6
CI 19-07 CA T7D5	7	16,323	68,2	17,7	9,32	1,90	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	24,7
CI 19-07 CA T7D6	7	16,469	68,2	17,7	9,32	1,89	-0,01	0,06	0,00	0,00	1,05	24,9

Tabela 5.24 – Parâmetros estatísticos da análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos -7 dias Concretagem 1.

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLE EM TESTEMUNHOS
CONCRETAGEM 01
VERIFICAÇÃO Y CONFORMAÇÃO DE LOTES

Referências

CU: Cura úmida

CA: Cura pela aspersão

$f_{c,est,t}$: resistência estimada dos

testemunhos (MPa)

\bar{X} : valor médio (MPa)

s: desvio padrão (MPa)

cv: coeficiente de variação

Divergência = $(f_{ci} - f_{c,est,t}) \cdot 100 / f_{c,est,t}$

T_1 : parâmetro superior

T_2 : parâmetro inferior

$t_{1\%}$: parâmetro de comparação ao nível 1% (ASTM E178-08)

Código testemunho	Idade (dias)	Divergência (%)	Parâmetros estatísticos painéis		Parâmetros estatísticos lotes	
			Panel A (CU) - 7 dias	Panel B (CA) - 7 dias	Panel A (CU) - 7 dias	Panel B (CA) - 7 dias
CI 19-07 CU T7A1	7	1.3%	Panel A (CU) - 7 dias $\bar{X}=31.5$ $s=1.54$ $cv=4.88\%$ Teste de normalidade $T_1=1.69$ $T_2=1.24$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	Panel B (CA) - 7 dias $\bar{X}=28.4$ $s=2.25$ $cv=7.94\%$ Teste de normalidade $T_1=1.09$ $T_2=1.58$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	CU (Painel A) - 7 dias $\bar{X}=31.5$ $s=1.54$ $cv=4.88\%$ Teste de normalidade $T_1=1.69$ $T_2=1.24$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	Painel A (CU) (CA)
CI 19-07 CU T7A2	7	-6.0%				
CI 19-07 CU T7A3	7	1.3%				
CI 19-07 CU T7A4	7	-2.5%				
CI 19-07 CU T7A5	7	-2.2%	Panel A (CU) - 7 dias $\bar{X}=31.5$ $s=1.54$ $cv=4.88\%$ Teste de normalidade $T_1=1.69$ $T_2=1.24$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	Panel B (CA) - 7 dias $\bar{X}=28.4$ $s=2.25$ $cv=7.94\%$ Teste de normalidade $T_1=1.09$ $T_2=1.58$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	CU (Painel A) - 7 dias $\bar{X}=31.5$ $s=1.54$ $cv=4.88\%$ Teste de normalidade $T_1=1.69$ $T_2=1.24$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	Painel B (CA) (CA)
CI 19-07 CU T7A6	7	8.3%				
CI 19-07 CA T7B1	7	-12.5%				
CI 19-07 CA T7B2	7	-6.2%				
CI 19-07 CA T7B3	7	5.1%	Panel A (CU) - 7 dias $\bar{X}=31.5$ $s=1.54$ $cv=4.88\%$ Teste de normalidade $T_1=1.69$ $T_2=1.24$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	Panel B (CA) - 7 dias $\bar{X}=28.4$ $s=2.25$ $cv=7.94\%$ Teste de normalidade $T_1=1.09$ $T_2=1.58$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	CU (Painel A) - 7 dias $\bar{X}=31.5$ $s=1.54$ $cv=4.88\%$ Teste de normalidade $T_1=1.69$ $T_2=1.24$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	Painel C (CA) (CA)
CI 19-07 CA T7B4	7	0.5%				
CI 19-07 CA T7B5	7	8.6%				
CI 19-07 CA T7B6	7	4.4%				
CI 19-07 CA T7C1	7	18.4%	Panel A (CU) - 7 dias $\bar{X}=31.5$ $s=1.54$ $cv=4.88\%$ Teste de normalidade $T_1=1.69$ $T_2=1.24$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	Panel B (CA) - 7 dias $\bar{X}=28.4$ $s=2.25$ $cv=7.94\%$ Teste de normalidade $T_1=1.09$ $T_2=1.58$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	CU (Painel A) - 7 dias $\bar{X}=31.5$ $s=1.54$ $cv=4.88\%$ Teste de normalidade $T_1=1.69$ $T_2=1.24$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	Painel D (CA) (CA)
CI 19-07 CA T7C2	7	-10.2%				
CI 19-07 CA T7C3	7	-1.6%				
CI 19-07 CA T7C4	7	-7.3%				
CI 19-07 CA T7C5	7	-5.5%	Panel A (CU) - 7 dias $\bar{X}=31.5$ $s=1.54$ $cv=4.88\%$ Teste de normalidade $T_1=1.69$ $T_2=1.24$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	Panel B (CA) - 7 dias $\bar{X}=28.4$ $s=2.25$ $cv=7.94\%$ Teste de normalidade $T_1=1.09$ $T_2=1.58$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	CU (Painel A) - 7 dias $\bar{X}=31.5$ $s=1.54$ $cv=4.88\%$ Teste de normalidade $T_1=1.69$ $T_2=1.24$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	CA (Painéis B, C y D) - 7 dias $\bar{X}=28.2$ $s=2.50$ $cv=8.86\%$ Teste de normalidade $T_1=2.01$ $T_2=1.39$ $t_{1\%}=2.93$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$
CI 19-07 CA T7C6	7	6.2%				
CI 19-07 CA T7D1	7	10.5%				
CI 19-07 CA T7D2	7	4.1%				
CI 19-07 CA T7D3	7	3.8%	Panel A (CU) - 7 dias $\bar{X}=31.5$ $s=1.54$ $cv=4.88\%$ Teste de normalidade $T_1=1.69$ $T_2=1.24$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	Panel B (CA) - 7 dias $\bar{X}=28.4$ $s=2.25$ $cv=7.94\%$ Teste de normalidade $T_1=1.09$ $T_2=1.58$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	CU (Painel A) - 7 dias $\bar{X}=31.5$ $s=1.54$ $cv=4.88\%$ Teste de normalidade $T_1=1.69$ $T_2=1.24$ $t_{1\%}=1.97$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 > t_{1\%}$	CA (Painéis B, C y D) - 7 dias $\bar{X}=28.2$ $s=2.50$ $cv=8.86\%$ Teste de normalidade $T_1=2.01$ $T_2=1.39$ $t_{1\%}=2.93$ Parâmetros Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ Não se descartam valores $T_2 < t_{1\%}$
CI 19-07 CA T7D4	7	5.2%				
CI 19-07 CA T7D5	7	-12.2%				
CI 19-07 CA T7D6	7	-11.5%				

(¹) Os valores dos ensaios que apresentaram divergências maiores que 15% foram descartados do análise estatística, conforme ao critério da norma ABNT NBR 7680-1:2015.

Tabela 5.25 – Análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos - 28 dias Concretagem 1.

**ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLE EM TESTEMUNHOS
CONCRETAGEM 01
VERIFICAÇÃO Y CONFORMAÇÃO DE LOTES**

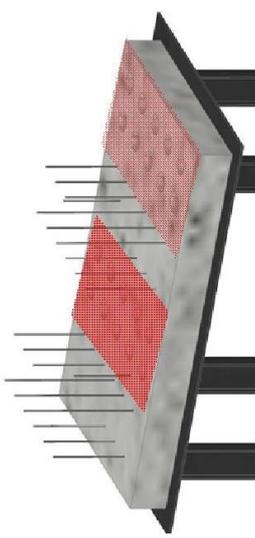
Referências

CU: Cura úmida

CA: Cura pela aspersão

Fator de correção (ABNT NBR 7680-1:2015)

$$k=1+(k_1+k_2+k_3+k_4)$$



Código testemunho	Idade (dias)	Carga máxima kg	Área cm ²	Altura (h) cm	Diâmetro (d) cm	(h/d)	Fatores de correção					Resistência corrigida MPa
							k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k	
C1 19-07 CU T28A1	28	23,527	67.9	18.0	9.30	1.93	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	35.7
C1 19-07 CU T28A2	28	22,662	67.6	17.9	9.28	1.93	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	34.5
C1 19-07 CU T28A3	28	23,759	67.9	17.9	9.30	1.92	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	36.0
C1 19-07 CU T28A4	28	22,711	68.2	18.1	9.32	1.94	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	34.3
C1 19-07 CU T28A5	28	24,805	68.7	17.9	9.35	1.91	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	37.2
C1 19-07 CA T28B1	28	22,385	68.7	17.9	9.35	1.91	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	33.6
C1 19-07 CA T28B2	28	22,335	69.0	17.8	9.37	1.90	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	33.4
C1 19-07 CA T28B3	28	20,652	68.7	17.5	9.35	1.87	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	31.0
C1 19-07 CA T28B4	28	21,317	69.0	17.6	9.37	1.88	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	31.8
C1 19-07 CA T28C1	28	23,498	67.6	17.9	9.28	1.92	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	35.8
C1 19-07 CA T28C2	28	26,242	67.6	17.8	9.28	1.92	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	40.0
C1 19-07 CA T28C3	28	22,809	67.6	17.8	9.28	1.92	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	34.7
C1 19-07 CA T28C4	28	20,583	67.9	18.0	9.30	1.94	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	31.2
C1 19-07 CA T28D1	28	23,423	68.2	17.9	9.32	1.92	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	35.4
C1 19-07 CA T28D2	28	25,519	67.9	18.1	9.30	1.95	0.00	0.06	0.00	0.00	1.06	39.1
C1 19-07 CA T28D3	28	24,175	68.7	18.0	9.35	1.92	-0.01	0.06	0.00	0.00	1.05	36.3

Tabela 5.26 – Parâmetros estatísticos da análise de valores de resistência à compressão simples de testemunhos -28 dias Concretagem 1.

Código testemunho	Idade (dias)	Divergência (%)	Parâmetros estatísticos painéis		Parâmetros estatísticos lotes	
			Panel A (CU) - 28 dias	Panel B (CA) - 28 dias	Panel A (CU) - 28 dias	Panel B (CA) - 28 dias
CI 19-07 CU T28A1	28	0.5%	Panel A (CU) - 28 dias $\bar{X}=35.5$ $s=1.18$ $cv=3.33\%$	Panel B (CA) - 28 dias $\bar{X}=32.5$ $s=1.26$ $cv=3.88\%$	CU (Panel A) - 28 dias $\bar{X}=35.5$ $s=1.18$ $cv=3.33\%$	Parâmetros $T_1 = 1.40$ $T_2 = 1.05$ $t_{1\%} = 1.76$
CI 19-07 CU T28A2	28	-2.9%				
CI 19-07 CU T28A3	28	1.3%				
CI 19-07 CU T28A4	28	-3.5%	Teste de normalidade	Teste de normalidade	Teste de normalidade	Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores
CI 19-07 CU T28A5	28	4.7%				
CI 19-07 CA T28B1	28	3.5%				
CI 19-07 CA T28B2	28	2.9%	Parâmetros $T_1 = 1.40$ $T_2 = 1.05$ $t_{1\%} = 1.76$	Parâmetros $T_1 = 0.91$ $T_2 = 1.15$ $t_{1\%} = 1.50$	Parâmetros $T_1 = 1.40$ $T_2 = 1.05$ $t_{1\%} = 1.76$	Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores
CI 19-07 CA T28B3	28	-4.5%				
CI 19-07 CA T28B4	28	-2.0%				
CI 19-07 CA T28C1	28	1.1%	Teste de normalidade	Teste de normalidade	Teste de normalidade	Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores
CI 19-07 CA T28C2	28	12.9%				
CI 19-07 CA T28C3	28	-2.0%				
CI 19-07 CA T28C4	28	-11.9%	Panel C (CA) - 28 dias $\bar{X}=35.4$ $s=3.63$ $cv=1.50\%$	Panel D (CA) - 28 dias $\bar{X}=36.9$ $s=1.93$ $cv=5.22\%$	CA (Painéis B, C y D) - 28 dias $\bar{X}=34.8$ $s=2.98$ $cv=8.58\%$	Parâmetros $T_1 = 1.26$ $T_2 = 1.17$ $t_{1\%} = 1.97$
CI 19-07 CA T28D1	28	-4.2%				
CI 19-07 CA T28D2	28	5.9%				
CI 19-07 CA T28D3	28	-1.7%	Teste de normalidade	Teste de normalidade	Teste de normalidade	Comprovação $T_1 < t_{1\%}$ $T_2 < t_{1\%}$ Não se descartam valores

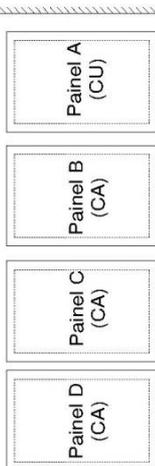
cv: coeficiente de variação
Divergência = $(f_{c,i} - f_{c,est,i}) \cdot 100 / f_{c,est,i}$
 T_1 : parâmetro superior
 T_2 : parâmetro inferior
 $t_{1\%}$: parâmetro de comparação ao nível 1% (ASTM E178-08)

$f_{c,est,i}$: resistência estimada dos testemunhos (MPa)
 \bar{X} : valor médio (MPa)
s: desvio padrão (MPa)

ENSAIOS DE COMPRESSÃO SIMPLE EM TESTEMUNHOS
CONCRETAGEM 01
VERIFICAÇÃO Y CONFORMAÇÃO DE LOTES

Referências

CU: Cura úmida
CA: Cura pela aspersão



(¹) Os valores dos ensaios que apresentaram divergências maiores que 15% foram descartados do análise estatística, conforme ao critério da norma ABNT NBR 7680-1:2015.

Tabela 5.27 – Resumo de valores de resistência à compressão simples de testemunhos extraídos dos painéis - Concretagem 1

Idade (dias)	Lote	Resistência de testemunhos (MPa)
3	CU	28,6
	CA	25,6
5	CU	27,2
	CA	25,9
7	CU	31,5
	CA	27,8
28	CU	35,5
	CA	34,9

Os valores de resistência à compressão simples nos testemunhos extraídos dos painéis com cura úmida mostram uma tendência crescente entre os 5 e os 28 dias com um valor médio de 35,5 MPa aos 28 dias. Os testemunhos extraídos dos painéis com cura pela aspersão mostram uma tendência crescente entre os 3 e os 28 dias com um valor médio de 34,8 MPa aos 28 dias, tendo eliminado-se um valor. Os coeficientes de variação estão compreendidos entre 3 % e 9,5 %. Os resultados obtidos nos testemunhos de todas as concretagens feitas são detalhados nos APÊNDICES A a F.

5.3.2.3 Tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT

No caso dos corpos de prova CAPULOT (*Cube Appropriate Pull-Out Test*), os dados de tensão máxima de aderência individual foram tratados seguindo o critério correspondente aos corpos de prova moldados conforme descrito na NBR 12655:2015 (ABNT, 2015c). Dessa forma, os valores obtidos dos CAPULOT que apresentaram o tipo de ruptura por fendilhamento nesse ensaio foram eliminados das análises posteriores. Após a verificação da normalidade da amostra, os dados foram agrupados por pares e, de cada um desses pares, foi obtido o maior valor. Finalmente, do conjunto desses maiores valores de cada par foi adotado o menor valor, por questão de segurança, que representa o grupo de corpos de prova CAPULOT de cada idade e concretagem.

Como foi verificado por contraste de hipóteses (test de Student), o tipo de cura, ou seja, cura no ar ou úmida, não tem influência na tensão máxima de aderência nos corpos de prova CAPULOT. A seguinte Tabela 5.28 apresenta o resumo dos resultados obtidos dos corpos de prova CAPULOT testadas aos 3 dias.

Tabela 5.28 – Resumo de valores de tensão máxima de aderência de corpos de prova CAPULOT - 3 dias Concretagem 1.

Corpos de prova 	Tensão máxima de aderência individual (MPa)	Tensão máxima de aderência dos exemplares (MPa)	Tensão de aderência do lote (MPa)
C1 19-07 CA A01	14,85	14,85	10,89
C1 19-07 CA A02	12,58		
C1 19-07 CA A03	14,28	16,55	
C1 19-07 CA A04	16,55		
C1 19-07 CA A05	Fendilhamento	10,89	
C1 19-07 CA A06	10,89		
C1 19-07 CA A07	15,41	16,55	
C1 19-07 CA A08	16,55		
C1 19-07 CA A09	16,55	16,55	
C1 19-07 CA A10	10,32		
C1 19-07 CA A11	13,15	13,15	
C1 19-07 CA A12	12,02		
C1 19-07 CU A01	13,15	13,72	
C1 19-07 CU A02	13,72		
C1 19-07 CU A03	10,32	11,45	
C1 19-07 CU A04	11,45		
C1 19-07 CU A05	14,28	15,41	
C1 19-07 CU A06	15,41		
C1 19-07 CU A07	13,15	13,15	
C1 19-07 CU A08	12,58		
C1 19-07 CU A09	10,89	14,85	
C1 19-07 CU A10	14,85		
C1 19-07 CU A11	10,32	14,28	
C1 19-07 CU A12	14,28		

Nas seguintes tabelas, apresentam-se os valores obtidos e as análises realizadas após ensaios de tensão última de aderência CAPULOT realizados em corpos de prova da Concretagem 1. Desse modo, as Tabela 5.29, Tabela 5.30, Tabela 5.31 e Tabela 5.32 são referentes a esses resultados obtidos, respectivamente, aos 3, 5, 7 e 28 dias. Na sequência, registra-se a Tabela 5.33 com o resumo desses resultados.

Tabela 5.29 – Análise de valores de tensão máxima de aderência de corpos de prova CAPULOT -3 dias Concretagem 1.

**ENSAIOS CAPULOT (CUBE APPROPRIATE PULL-OUT TEST)
CONCRETAGEM 01**

Referências
 CU: Cura úmida
 CA: Cura no ambiente
 X̄: valor médio (MPa)
 s: desvio padrão (MPa)
 cv: coeficiente de variação

T₁ : parâmetro superior
T₂ : parâmetro inferior
t_{5%} : parâmetro de comparação
 ao nível 5% (ASTME178-08)

Calibração do equipamento de ensaio
 fa = 56,833 Lf + 15,476
 fa: força de arrancamento (kN)
 Lf: leitura final do manômetro (Bar)



Código amostra	Idade (dias)	Leitura início (Bar)	Leitura final (Bar)	Força de arrancamento (kN)	Tensão última de aderência (MPa)	Observações (2)	Tensão última de aderência do exemplar (MPa)	Parâmetros estatísticos
C1 19-07 CA A01	3	-0,29	-0,01	14,91	14,85		14,85	3 dias X̄=13,4 s=2,05 cv=15,4% Teste de normalidade T ₁ = 1,55 T ₂ = 1,49 t _{5%} = 2,78 T ₁ < t _{5%} Não se descartam valores T ₂ < t _{5%} Tensão última de aderência f _{capulot} = 10,9
C1 19-07 CA A02	3	-0,29	-0,05	12,63	12,58		14,85	
C1 19-07 CA A03	3	-0,29	-0,02	14,34	14,28		16,55	
C1 19-07 CA A04	3	-0,29	0,02	16,61	16,55		16,55	
C1 19-07 CA A05	3	-0,29	0,06	18,89		Fendilhamento	10,89	
C1 19-07 CA A06	3	-0,29	-0,08	10,93	10,89		10,89	
C1 19-07 CA A07	3	-0,29	0,00	15,48	15,41		16,55	
C1 19-07 CA A08	3	-0,29	0,02	16,61	16,55		16,55	
C1 19-07 CA A09	3	-0,29	0,02	16,61	16,55		16,55	
C1 19-07 CA A10	3	-0,29	-0,09	10,36	10,32		16,55	
C1 19-07 CA A11	3	-0,29	-0,04	13,20	13,15		13,15	
C1 19-07 CA A12	3	-0,29	-0,06	12,07	12,02		13,15	
C1 19-07 CU A01	3	-0,29	-0,04	13,20	13,15		13,72	
C1 19-07 CU A02	3	-0,29	-0,03	13,77	13,72		13,72	
C1 19-07 CU A03	3	-0,29	-0,09	10,36	10,32		11,45	
C1 19-07 CU A04	3	-0,29	-0,07	11,50	11,45		11,45	
C1 19-07 CU A05	3	-0,29	-0,02	14,34	14,28		15,41	
C1 19-07 CU A06	3	-0,29	0,00	15,48	15,41		15,41	
C1 19-07 CU A07	3	-0,29	-0,04	13,20	13,15		13,15	
C1 19-07 CU A08	3	-0,29	-0,05	12,63	12,58		13,15	
C1 19-07 CU A09	3	-0,29	-0,08	10,93	10,89		14,85	
C1 19-07 CU A10	3	-0,29	-0,01	14,91	14,85		14,85	
C1 19-07 CU A11	3	-0,29	-0,09	10,36	10,32		14,85	
C1 19-07 CU A12	3	-0,29	-0,02	14,34	14,28		14,28	

(2) Os valores dos ensaios que apresentaram fendilhamento foram descartados do análise estatística.

Tabela 5.30 – Análise de valores de tensão máxima de aderência de corpos de prova CAPULOT- 5 dias Concretagem 1.

**ENSAIOS CAPULOT (CUBE APPROPRIATE PULL-OUT TEST)
CONCRETAGEM 01**

Referências

CU: Cura úmida
CA: Cura no ambiente
X: valor médio (MPa)
s: desvio padrão (MPa)
cv: coeficiente de variação

T₁: parâmetro superior
T₂: parâmetro inferior
t_{5%}: parâmetro de comparação
ao nível 5% (ASTM E178-08)

Calibração do equipamento de ensaio
fa = 56,833 Lf + 15,476
fa: força de arrancamento (kN)
Lf: leitura final do manômetro (Bar)



Código amostra	Idade (dias)	Leitura início (Bar)	Leitura final (Bar)	Força de arrancamento (kN)	Tensão última de aderência (MPa)	Observações (°)	Tensão última de aderência do exemplar (MPa)	Parâmetros estatísticos
C1 19-07 CA A13	5	-0,29	-0,02	14,34	14,28			5 dias $\bar{X} = 17,2$ $s = 1,89$ $cv = 10,9\%$
C1 19-07 CA A14	5	-0,29	-0,01	14,91	14,85		14,85	
C1 19-07 CA A15	5	-0,29	0,02	16,61	16,55			Teste de normalidade T ₁ = 2,03 T ₂ = 1,57 t _{5%} = 2,73
C1 19-07 CA A16	5	-0,29	0,06	18,89	18,81		18,81	
C1 19-07 CA A17	5	-0,29	-0,03	13,77		Fendilhamento		Comprovação T ₁ < t _{5%} T ₂ < t _{5%} Não se descartam valores
C1 19-07 CA A18	5	-0,29	0,06	18,89	18,81		18,81	
C1 19-07 CA A19	5	-0,29	0,02	16,61	16,55			Tensão última de aderência f _{capulot} = 14,8
C1 19-07 CA A20	5	-0,29	0,04	17,75	17,68		17,68	
C1 19-07 CA A21	5	-0,29	0,05	18,32	18,24			Tensão última de aderência
C1 19-07 CA A22	5	-0,29	0,02	16,61	16,55		18,24	
C1 19-07 CA A23	5	-0,29	0,06	18,89	18,81			Tensão última de aderência
C1 19-07 CA A24	5	-0,29	0,10	21,16	21,08		21,08	
C1 19-07 CU A13	5	-0,29	0,08	20,02	19,94			Tensão última de aderência
C1 19-07 CU A14	5	-0,29	0,01	16,04	15,98		19,94	
C1 19-07 CU A15	5	-0,29	0,12	22,30		Fendilhamento		Tensão última de aderência
C1 19-07 CU A16	5	-0,29	0,15	24,00		Fendilhamento		
C1 19-07 CU A17	5	-0,29	0,05	18,32	18,24			Tensão última de aderência
C1 19-07 CU A18	5	-0,29	0,06	18,89	18,81		18,81	
C1 19-07 CU A19	5	-0,29	0,02	16,61	16,55			Tensão última de aderência
C1 19-07 CU A20	5	-0,29	0,02	16,61	16,55		16,55	
C1 19-07 CU A21	5	-0,29	0,06	18,89	18,81			Tensão última de aderência
C1 19-07 CU A22	5	-0,29	0,01	16,04	15,98		18,81	
C1 19-07 CU A23	5	-0,29	-0,02	14,34	14,28			Tensão última de aderência
C1 19-07 CU A24	5	-0,29	-0,01	14,91	14,85		14,85	

(°) Os valores dos ensaios que apresentaram fendilhamento foram descartados do análise estatística.

Tabela 5.31 – Análise de valores de tensão máxima de aderência de corpos de prova CAPULOT -7 dias Concretagem 1.



**ENSAIOS CAPULOT (CUBE APPROPRIATE PULL-OUT TEST)
CONCRETAGEM 01**

Referências
 CU: Cura úmida
 CA: Cura no ambiente
 X: valor médio (MPa)
 s: desvio padrão (MPa)
 cv: coeficiente de variação

T₁: parâmetro superior
T₂: parâmetro inferior
f_{5%}: parâmetro de comparação ao nível 5% (ASTM E178-08)

C: Calibração do equipamento de ensaio
fa = 56,833 Lf + 15,476
fa: força de arrancamento (kN)
Lf: leitura final do manômetro (Bar)

Código amostra	Idade (dias)	Leitura início (Bar)	Leitura final (Bar)	Força de arrancamento (kN)	Tensão última de aderência (MPa)	Observações (²)	Tensão última de aderência do exemplar (MPa)	Parâmetros estatísticos
C1 19-07 CA A25	7	-0,29	0,01	16,04	15,98		15,98	5 dias X=16,4 s=1,60 cv=9,7%
C1 19-07 CA A26	7	-0,29	0,00	15,48	15,41		15,98	
C1 19-07 CA A27	7	-0,29	0,00	15,48	15,41		15,98	
C1 19-07 CA A28	7	-0,29	-0,01	14,91	14,85		15,41	Teste de normalidade T ₁ = 1,49 T ₂ = 2,05 f _{5%} = 2,68
C1 19-07 CA A29	7	-0,29	0,05	18,32	18,24		15,41	
C1 19-07 CA A30	7	-0,29	0,12	22,30		Fendilhamento	18,24	
C1 19-07 CA A31	7	-0,29	0,13	22,86		Fendilhamento		Comprovação T ₁ < f _{5%} T ₂ < f _{5%} Não se descartam valores
C1 19-07 CA A32	7	-0,29	-0,01	14,91	14,85		14,85	
C1 19-07 CA A33	7	-0,29	0,05	18,32	18,24		14,85	
C1 19-07 CA A34	7	-0,29	0,05	18,32	18,24		18,24	Tensão última de aderência f _{capulot} = 14,8
C1 19-07 CA A35	7	-0,29	0,11			Fendilhamento		
C1 19-07 CA A36	7	-0,29	0,00	15,48	15,41		15,41	
C1 19-07 CU A25	7	-0,29	0,00	15,48	15,41		15,41	15,41
C1 19-07 CU A26	7	-0,29	-0,04	13,20	13,15		15,41	
C1 19-07 CU A27	7	-0,29	0,06	18,89	18,81		15,41	
C1 19-07 CU A28	7	-0,29	0,02	16,61	16,55		18,81	18,81
C1 19-07 CU A29	7	-0,29	0,10	21,16		Fendilhamento	18,81	
C1 19-07 CU A30	7	-0,29	0,02	16,61	16,55		18,81	
C1 19-07 CU A31	7	-0,29	0,05	18,32	18,24		16,55	16,55
C1 19-07 CU A32	7	-0,29	0,02	16,61	16,55		16,55	
C1 19-07 CU A33	7	-0,29	0,01	16,04	15,98		18,24	
C1 19-07 CU A34	7	-0,29	0,11	21,73		Fendilhamento	15,98	15,98
C1 19-07 CU A35	7	-0,29	0,00	15,48	15,41		15,98	
C1 19-07 CU A36	7	-0,29	0,06	18,89	18,81		15,41	

(²) Os valores dos ensaios que apresentaram fendilhamento foram descartados do análise estatística.

Tabela 5.32 – Análise de valores de tensão máxima de aderência de corpos de prova CAPULOT -28 dias Concretagem 1.

**ENSAIOS CAPULOT (CUBE APPROPRIATE PULL-OUT TEST)
CONCRETAGEM 01**

Referências

CU: Cura úmida
CA: Cura no ambiente
 \bar{X} : valor médio (MPa)
s: desvio padrão (MPa)
cv: coeficiente de variação

T_1 : parâmetro superior
 T_2 : parâmetro inferior
 $t_{5\%}$: parâmetro de comparação
ao nível 5% (ASTM E178-08)

Calibração do equipamento de ensaio
fa = 56,833 Lf + 15,476
fa: força de arrancamento (kN)
Lf: leitura final do manômetro (Bar)



Código amostra	Idade (dias)	Leitura início (Bar)	Leitura final (Bar)	Força de arrancamento (kN)	Tensão última de aderência (MPa)	Observações (°)	Tensão última de aderência do exemplar (MPa)	Parâmetros estatísticos	
C1 19-07 CA A37	28	-0.29	-0.16	6.38		Fendilhamento		28 dias \bar{X} = 18,6 s = 2,82 cv = 15,2%	
C1 19-07 CA A38	28	-0.29	-0.12	8.66		Fendilhamento			
C1 19-07 CA A39	28	-0.29	0.10	21.16		Fendilhamento	18,24		
C1 19-07 CA A40	28	-0.29	0.05	18.32	18,24			Teste de normalidade T_1 = 1,08 T_2 = 1,53 $t_{5\%}$ = 1,72	
C1 19-07 CA A41	28	-0.29	-0.02	14.34	14,28		18,24		
C1 19-07 CA A42	28	-0.29	0.05	18.32	18,24		18,24		
C1 19-07 CU A37	28	-0.29	0.11	21.73	21,64			Parâmetros T_1 = 1,08 T_2 = 1,53 $t_{5\%}$ = 1,72	
C1 19-07 CU A38	28	-0.29	0.09	20.59	20,51		21,64		
							Comprovação	$T_1 < t_{5\%}$ $T_2 < t_{5\%}$	Não se descartam valores
							Tensão última de aderência	$f_{\text{capulot}} = 18,2$	

(°) Os valores dos ensaios que apresentaram fendilhamento foram descartados do análise estatística.

Tabela 5.33 – Resumo de valores de tensão máxima de aderência de corpos de prova CAPULOT Concretagem 1

Idade (días)	Tensão máxima de aderência (MPa)
3	10,9
5	14,8
7	14,8
28	18,2

A tensão máxima de aderência nos corpos de prova CAPULOT mostra também uma tendência crescente entre os 3 e os 28 dias, aos 7 dias não mostra incrementos. As variações estão compreendidas entre 9,7 % e 15,4 %, sendo que as maiores foram geradas nos grupos com maior quantidade de corpos de prova.

5.3.2.4 Tensão máxima de aderência em painéis SBPULOT

No caso dos ensaios de arrancamento em painéis SBPULOT (*Steel Bar Pull-Out Test*), os dados de tensão máxima de aderência individuais foram tratados seguindo o mesmo critério correspondente aos adotados nos testemunhos analisados no item anterior, ou seja, seguindo o critério correspondente aos corpos de prova moldados conforme descrito na NBR 12655:2015 (ABNT, 2015c). Para as amostras ensaiadas conforme a idade e segundo o tipo de cura, foram calculadas as médias das tensões últimas de aderência correspondentes a cada uma.

Nas seguintes tabelas, apresentam-se os valores obtidos e as análises realizadas após ensaios de tensão máxima de aderência SBPULOT realizados em corpos de prova de painéis da Concretagem 1. Desse modo, as Tabela 5.34, Tabela 5.35, Tabela 5.36, Tabela 5.37, Tabela 5.38, Tabela 5.39, Tabela 5.40 e Tabela 5.41 são referentes a esses resultados obtidos, respectivamente, aos 3, 3, 5, 5, 7, 7, 28 e 28 dias, sendo que a segunda tabela de cada dia apresenta os parâmetros estatísticos para lotes calculados. Na sequência, registra-se a Tabela 5.42 com o resumo desses resultados para curas e úmida e pela aspersão.

Tabela 5.34 – Análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT -3 dias Concretagem 1.

**ENSAIOS SBPULOT (STEEL BAR PULL-OUT TEST)
CONCRETAGEM 01**

Referências

CU: Cura úmida

CA: Cura pela aspersão

\bar{X} : valor médio (MPa)

s: desvio padrão (MPa)

cv: coeficiente de variação

T₁: parâmetro superior

T₂: parâmetro inferior

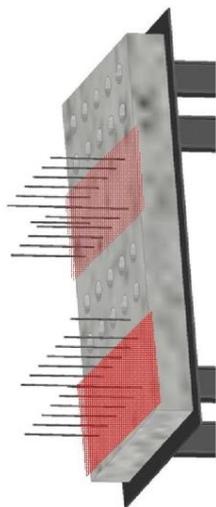
t_{5%}: parâmetro de comparação ao nível 5% (ASTM E178-08)

Calibração do equipamento de ensaio

fa = 56,833 Lf + 15,476

fa: força de arrancamento (kN)

Lf: leitura final do manômetro (Bar)



Identificação	Idade (dias)	Leitura final (Bar)	Força de arrancamento (kN)	Tensão última de aderência (MPa)	Observações ^(c)	Parâmetros estatísticos painéis	
						Painel A (CU) - 3 dias	Painel B (CA) - 3 dias
C1 19-07 CU AP3A1	3	-0,08	10,93	10,89		Teste de normalidade T ₁ = 0,91 T ₂ = 1,81 t _{5%} = 1,89	Painel B (CA) - 3 dias \bar{X} = 13,9 s = 1,67 cv = 12,0%
C1 19-07 CU AP3A2	3	-0,12	8,66	8,62			
C1 19-07 CU AP3A3	3	-0,08	10,93	10,89		Teste de normalidade T ₁ = 1,55 T ₂ = 1,44 t _{5%} = 1,89	Painel A (CU) - 3 dias \bar{X} = 11,1 s = 1,70 cv = 15,4%
C1 19-07 CU AP3A4	3	-0,06	12,07	12,02			
C1 19-07 CU AP3A5	3	-0,03	13,77	13,72		Teste de normalidade T ₁ = 1,38 T ₂ = 0,88 t _{5%} = 1,89	Painel C (CA) - 3 dias \bar{X} = 13,3 s = 1,50 cv = 11,3%
C1 19-07 CU AP3A6	3	-0,09	10,36	10,32			
C1 19-07 CA AP3B1	3	-0,02	14,34	14,28		Teste de normalidade T ₁ < t _{5%} T ₂ < t _{5%} Não se descartam valores	Painel D (CA) - 3 dias \bar{X} = 12,2 s = 2,17 cv = 17,8%
C1 19-07 CA AP3B2	3	-0,01	14,91	14,85			
C1 19-07 CA AP3B3	3	-0,08	10,93	10,89		Teste de normalidade T ₁ < t _{5%} T ₂ < t _{5%} Não se descartam valores	Painel B (CA) - 3 dias \bar{X} = 11,3 s = 1,50 cv = 17,8%
C1 19-07 CA AP3B4	3	0	15,48	15,41			
C1 19-07 CA AP3B5	3	-0,04	13,20	13,15		Teste de normalidade T ₁ = 1,38 T ₂ = 0,88 t _{5%} = 1,89	Painel A (CU) - 3 dias \bar{X} = 11,1 s = 1,70 cv = 15,4%
C1 19-07 CA AP3B6	3	-0,01	14,91	14,85			
C1 19-07 CA AP3C1	3	-0,02	14,34	14,28		Teste de normalidade T ₁ < t _{5%} T ₂ < t _{5%} Não se descartam valores	Painel C (CA) - 3 dias \bar{X} = 13,3 s = 1,50 cv = 11,3%
C1 19-07 CA AP3C2	3	-0,02	14,34	14,28			
C1 19-07 CA AP3C3	3	-0,06	12,07	12,02		Teste de normalidade T ₁ = 1,48 T ₂ = 1,39 t _{5%} = 1,89	Painel D (CA) - 3 dias \bar{X} = 12,2 s = 2,17 cv = 17,8%
C1 19-07 CA AP3C4	3	-0,06	12,07	12,02			
C1 19-07 CA AP3C5	3	0	15,48	15,41		Teste de normalidade T ₁ < t _{5%} T ₂ < t _{5%} Não se descartam valores	Painel A (CU) - 3 dias \bar{X} = 11,1 s = 1,70 cv = 15,4%
C1 19-07 CA AP3C6	3	-0,06	12,07	12,02			
C1 19-07 CA AP3D1	3	-0,06	12,07	12,02		Teste de normalidade T ₁ < t _{5%} T ₂ < t _{5%} Não se descartam valores	Painel B (CA) - 3 dias \bar{X} = 13,9 s = 1,67 cv = 12,0%
C1 19-07 CA AP3D2	3	-0,06	12,07	12,02			
C1 19-07 CA AP3D3	3	-0,03	13,77	13,72		Teste de normalidade T ₁ < t _{5%} T ₂ < t _{5%} Não se descartam valores	Painel C (CA) - 3 dias \bar{X} = 13,3 s = 1,50 cv = 11,3%
C1 19-07 CA AP3D4	3	-0,08	10,93	10,89			
C1 19-07 CA AP3D5	3	-0,11	9,22	9,19		Teste de normalidade T ₁ = 1,38 T ₂ = 0,88 t _{5%} = 1,89	Painel D (CA) - 3 dias \bar{X} = 12,2 s = 2,17 cv = 17,8%
C1 19-07 CA AP3D6	3	0	15,48	15,41			

^(c) Os valores com observações foram descartados para o análise estatística devido ao possível deslocamento do material não aderente.

Tabela 5.35 – Parâmetros estatísticos para lotes da análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT -3 dias Concretagem 1.

**ENSAIOS SBPULOT (STEEL BAR PULL-OUT TEST)
CONCRETAGEM 01**

Referências

CU: Cura úmida

CA: Cura pela aspersão

\bar{X} : valor médio (MPa)

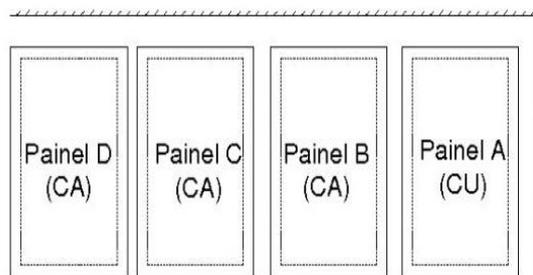
s: desvio padrão (MPa)

cv: coeficiente de variação

T_1 : parâmetro superior

T_2 : parâmetro inferior

$t_{5\%}$: parâmetro de comparação ao nível 5% (ASTM E178-08)



Identificação	Idade (dias)	Parâmetros estatísticos lotes	
C1 19-07 CU AP3A1	3	CU (Painel A) - 3 dias	
C1 19-07 CU AP3A2	3	\bar{X} = 11,1 s = 1,70 cv = 15,4%	
C1 19-07 CU AP3A3	3		
C1 19-07 CU AP3A4	3		
C1 19-07 CU AP3A5	3	Teste de normalidade	
C1 19-07 CU AP3A6	3	Parâmetros	T_1 = 1,55
C1 19-07 CA AP3B1	3		T_2 = 1,44
C1 19-07 CA AP3B2	3		$t_{5\%}$ = 1,89
C1 19-07 CA AP3B3	3	Comprovação	$T_1 < t_{5\%}$ $T_2 < t_{5\%}$
C1 19-07 CA AP3B4	3		
C1 19-07 CA AP3B5	3		
C1 19-07 CA AP3B6	3		
C1 19-07 CA AP3C1	3	CA (Painéis B, C y D) - 3 dias	
C1 19-07 CA AP3C2	3	\bar{X} = 13,2 s = 1,84 cv = 14,0%	
C1 19-07 CA AP3C3	3		
C1 19-07 CA AP3C4	3		
C1 19-07 CA AP3C5	3	Teste de normalidade	
C1 19-07 CA AP3C6	3	Parâmetros	T_1 = 1,23
C1 19-07 CA AP3D1	3		T_2 = 2,15
C1 19-07 CA AP3D2	3		$t_{5\%}$ = 2,65
C1 19-07 CA AP3D3	3	Comprovação	$T_1 < t_{5\%}$ $T_2 < t_{5\%}$
C1 19-07 CA AP3D4	3		
C1 19-07 CA AP3D5	3		
C1 19-07 CA AP3D6	3		

Tabela 5.36 – Análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT -5 dias Concretagem 1.

ENSAIOS SBPULOT (STEEL BAR PULL-OUT TEST)
CONCRETAGEM 01

Referências

CU: Cura úmida

CA: Cura pela aspersão

X̄: valor médio (MPa)

s: desvio padrão (MPa)

cv: coeficiente de variação

T₁: parâmetro superior

T₂: parâmetro inferior

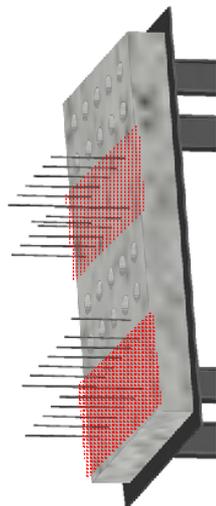
t_{5%}: parâmetro de comparação ao nível 5% (ASTM E178-08)

Calibração do equipamento de ensaio

f_a = 56,833 Lf + 15,476

f_a: força de arrancamento (kN)

Lf: leitura final do manômetro (Bar)



Identificação	Idade (dias)	Leitura final (Bar)	Força de arrancamento (kN)	Tensão última de aderência (MPa)	Observações (c)	Parâmetros estatísticos painéis	
C1 19-07 CU AP5A1	5	0,02	16,61	16,55		Panel A (CU) - 5 dias	Panel B (CA) - 5 dias
C1 19-07 CU AP5A2	5	-0,04	13,20	13,15		X̄=13,2	X̄=16,1
C1 19-07 CU AP5A3	5	-0,06	12,07	12,02		s=1,91	s=1,58
C1 19-07 CU AP5A4	5	-0,06	12,07	12,02		cv=14,4%	cv=9,81%
C1 19-07 CU AP5A5	5	-0,07	11,50	11,45		Teste de normalidade	
C1 19-07 CU AP5A6	5	-0,02	14,34	14,28		T ₁ = 1,73	T ₁ = 1,38
C1 19-07 CA AP5B1	5	0,01	16,04	15,98		T ₂ = 0,94	T ₂ = 1,14
C1 19-07 CA AP5B2	5	0,04	17,75	17,68		t _{5%} = 1,89	t _{5%} = 1,89
C1 19-07 CA AP5B3	5	0	15,48	15,41		T ₁ < t _{5%}	T ₁ < t _{5%}
C1 19-07 CA AP5B4	5	-0,01	14,91	14,85		T ₂ < t _{5%}	T ₂ < t _{5%}
C1 19-07 CA AP5B5	5	0,05	18,32	18,24		Não se descartam valores	
C1 19-07 CA AP5B6	5	-0,02	14,34	14,28		Comprovação	
C1 19-07 CA AP5C1	5	0,04	17,75	17,68		Panel C (CA) - 5 dias	
C1 19-07 CA AP5C2	5	-0,06	12,07	12,02		X̄=16,4	Panel D (CA) - 5 dias
C1 19-07 CA AP5C3	5	-0,02	14,34	14,28		s=2,74	X̄=15,4
C1 19-07 CA AP5C4	5	0,05	18,32	18,24		cv=16,8%	s=1,13
C1 19-07 CA AP5C5	5	0,07	19,45	19,38		Teste de normalidade	
C1 19-07 CA AP5C6	5	0,02	16,61	16,55		T ₁ = 1,10	T ₁ = 1,50
C1 19-07 CA AP5D1	5	0	15,48	15,41		T ₂ = 1,58	T ₂ = 1,50
C1 19-07 CA AP5D2	5	-0,03	13,77	13,72		t _{5%} = 1,89	t _{5%} = 1,89
C1 19-07 CA AP5D3	5	-0,01	14,91	14,85		T ₁ < t _{5%}	T ₁ < t _{5%}
C1 19-07 CA AP5D4	5	0,01	16,04	15,98		T ₂ < t _{5%}	T ₂ < t _{5%}
C1 19-07 CA AP5D5	5	0,03	17,18	17,11		Comprovação	
C1 19-07 CA AP5D6	5	0	15,48	15,41		Comprovação	

(c) Os valores com observações foram descartados para o análise estatística devido ao possível deslocamento do material não aderente.

Tabela 5.37 – Parâmetros estatísticos para lotes da análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT - 5 dias Concretagem 1.

**ENSAIOS SBPULOT (STEEL BAR PULL-OUT TEST)
CONCRETAGEM 01**

Referências

CU: Cura úmida

CA: Cura pela aspersão

\bar{X} : valor médio (MPa)

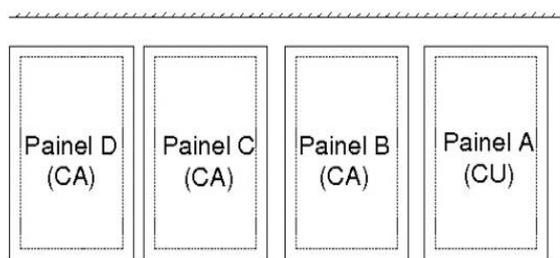
s: desvio padrão (MPa)

cv: coeficiente de variação

T_1 : parâmetro superior

T_2 : parâmetro inferior

$t_{5\%}$: parâmetro de comparação ao ní vel 5% (ASTM E178-08)



Identificação	Idade (dias)	Parâmetros estatísticos lotes		
C1 19-07 CU AP5A1	5	CU (Painel A) - 5 dias		
C1 19-07 CU AP5A2	5	$\bar{X} = 13,2$ $s = 1,91$ $cv = 14,4\%$		
C1 19-07 CU AP5A3	5			
C1 19-07 CU AP5A4	5			
C1 19-07 CU AP5A5	5			
C1 19-07 CU AP5A6	5	Teste de normalidade		
C1 19-07 CA AP5B1	5	Parâmetros	$T_1 = 1,73$	
C1 19-07 CA AP5B2	5		$T_2 = 0,94$	
C1 19-07 CA AP5B3	5		$t_{5\%} = 1,89$	
C1 19-07 CA AP5B4	5	Comprovação	$T_1 < t_{5\%}$	Não se descartam valores
C1 19-07 CA AP5B5	5		$T_2 < t_{5\%}$	
C1 19-07 CA AP5B6	5			
C1 19-07 CA AP5C1	5	CA (Painéis B, C y D) - 5 dias		
C1 19-07 CA AP5C2	5	$\bar{X} = 15,9$ $s = 1,87$ $cv = 11,7\%$		
C1 19-07 CA AP5C3	5			
C1 19-07 CA AP5C4	5			
C1 19-07 CA AP5C5	5			
C1 19-07 CA AP5C6	5	Teste de normalidade		
C1 19-07 CA AP5D1	5	Parâmetros	$T_1 = 1,84$	
C1 19-07 CA AP5D2	5		$T_2 = 2,11$	
C1 19-07 CA AP5D3	5		$t_{5\%} = 2,65$	
C1 19-07 CA AP5D4	5	Comprovação	$T_1 < t_{5\%}$	Não se descartam valores
C1 19-07 CA AP5D5	5		$T_2 < t_{5\%}$	
C1 19-07 CA AP5D6	5			

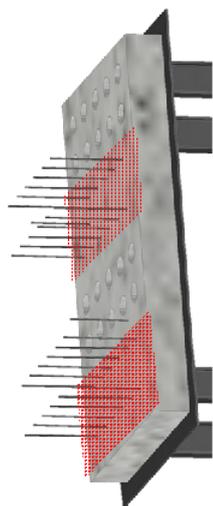
Tabela 5.38 – Análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT- 7 dias Concretagem 1.

ENSAIOS SBPULOT (STEEL BAR PULL-OUT TEST)
CONCRETAGEM 01

Referências

CU: Cura úmida
CA: Cura pela aspersão
X: valor médio (MPa)
s: desvio padrão (MPa)
cv: coeficiente de variação
T₁: parâmetro superior
T₂: parâmetro inferior
t_{5%}: parâmetro de comparação ao nível 5% (ASTM E178-08)

Calibração do equipamento de ensaio
fa = 56,833 Lf + 15,476
fa: força de arrancamento (kN)
Lf: leitura final do manômetro (Bar)



Identificação	Idade (dias)	Leitura final (Bar)	Força de arrancamento (kN)	Tensão última de aderência (MPa)	Observações (c)	Parâmetros estatísticos painéis			
						Panel A (CU) - 7 dias	Panel B (CA) - 7 dias	Panel C (CA) - 7 dias	Panel D (CA) - 7 dias
C1 19-07 CU AP7A1	7	0,02	16,61	16,55		Teste de normalidade			
C1 19-07 CU AP7A2	7	-0,01	14,91	14,85		Teste de normalidade			
C1 19-07 CU AP7A3	7	0	15,48	15,41		Teste de normalidade			
C1 19-07 CU AP7A4	7	-0,03	13,77	13,72		Teste de normalidade			
C1 19-07 CU AP7A5	7	0,01	16,04	15,98		Teste de normalidade			
C1 19-07 CU AP7A6	7	-0,04	13,20	13,15		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7B1	7	0	15,48	15,41		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7B2	7	0,02	16,61	16,55		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7B3	7	0,06	18,89	18,81		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7B4	7	0	15,48	15,41		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7B5	7	0,03	17,18	17,11		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7B6	7	0,01	16,04	15,98		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7C1	7	0,1			Deslocamento	Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7C2	7	-0,01	14,91	14,85		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7C3	7	0,08			Deslocamento	Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7C4	7	-0,04	13,20	13,15		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7C5	7	-0,03	13,77	13,72		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7C6	7	-0,01	14,91	14,85		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7D1	7	-0,02	14,34	14,28		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7D2	7	-0,01	14,91	14,85		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7D3	7	0,02	16,61	16,55		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7D4	7	-0,01	14,91	14,85		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7D5	7	-0,03	13,77	13,72		Teste de normalidade			
C1 19-07 CA AP7D6	7	-0,04	13,20	13,15		Teste de normalidade			

(c) Os valores com observações foram descartados para o análise estatística devido ao possível deslocamento do material não aderente.

Tabela 5.39 – Parâmetros estatísticos para lotes da análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT- 7 dias Concretagem 1.

**ENSAIOS SBPULOT (STEEL BAR PULL-OUT TEST)
CONCRETAGEM 01**

Referências

CU: Cura úmida

CA: Cura pela aspersão

\bar{X} : valor médio (MPa)

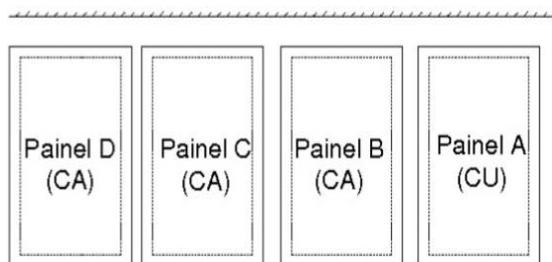
s: desvio padrão (MPa)

cv: coeficiente de variação

T_1 : parâmetro superior

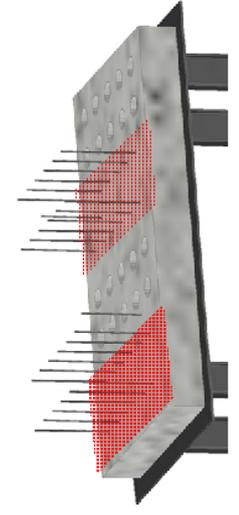
T_2 : parâmetro inferior

$t_{5\%}$: parâmetro de comparação ao nível 5% (ASTM E178-08)



Identificação	Idade (dias)	Parâmetros estatísticos lotes	
C1 19-07 CU AP5A1	5	CU (Painel A) - 5 dias	
C1 19-07 CU AP5A2	5	$\bar{X}=13,2$	
C1 19-07 CU AP5A3	5	s= 1,91	
C1 19-07 CU AP5A4	5	cv= 14,4%	
C1 19-07 CU AP5A5	5	Teste de normalidade	
C1 19-07 CU AP5A6	5	Parâmetros	$T_1 = 1,73$
C1 19-07 CA AP5B1	5		$T_2 = 0,94$
C1 19-07 CA AP5B2	5		$t_{5\%} = 1,89$
C1 19-07 CA AP5B3	5	Comprovação	$T_1 < t_{5\%}$
C1 19-07 CA AP5B4	5		$T_2 < t_{5\%}$
C1 19-07 CA AP5B5	5		
C1 19-07 CA AP5B6	5		
C1 19-07 CA AP5C1	5	CA (Painéis B, C y D) - 5 dias	
C1 19-07 CA AP5C2	5	$\bar{X}=15,9$	
C1 19-07 CA AP5C3	5	s= 1,87	
C1 19-07 CA AP5C4	5	cv= 11,7%	
C1 19-07 CA AP5C5	5	Teste de normalidade	
C1 19-07 CA AP5C6	5	Parâmetros	$T_1 = 1,84$
C1 19-07 CA AP5D1	5		$T_2 = 2,11$
C1 19-07 CA AP5D2	5		$t_{5\%} = 2,65$
C1 19-07 CA AP5D3	5	Comprovação	$T_1 < t_{5\%}$
C1 19-07 CA AP5D4	5		$T_2 < t_{5\%}$
C1 19-07 CA AP5D5	5		
C1 19-07 CA AP5D6	5		

Tabela 5.40 – Análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT- 28 dias Concretagem 1.



**ENSALOS SBPULOT (STEEL BAR PULL-OUT TEST)
CONCRETAGEM 01**

Referências
 CU: Cura úmida
 CA: Cura pela aspersão
 \bar{X} : valor médio (MPa)
 s: desvio padrão (MPa)
 cv: coeficiente de variação
 T_1 : parâmetro superior
 T_2 : parâmetro inferior
 $t_{5\%}$: parâmetro de comparação ao nível 5% (ASTM.E178-08)

Calibração do equipamento de ensaio
 fa = 56,833 Lf + 15,476
 fa: força de arrancamento (kN)
 Lf: leitura final do manômetro (Bar)

Identificação	Idade (dias)	Leitura final (Bar)	Força de arrancamento (kN)	Tensão última de aderência (MPa)	Observações (1)
C1 19-07 CU AP28A1	28	-0,06	12,07	12,02	
C1 19-07 CU AP28A2	28	-0,03	13,77	13,72	
C1 19-07 CU AP28A3	28	0,08	20,02	19,94	
C1 19-07 CU AP28A4	28	0	15,48	15,41	
C1 19-07 CU AP28A5	28	0,04	17,75	17,68	
C1 19-07 CU AP28A6	28	-0,04	13,20	13,15	
C1 19-07 CA AP28B1	28	0,08	20,02	19,94	
C1 19-07 CA AP28B2	28	0,01	16,04	15,98	
C1 19-07 CA AP28B3	28	0,03	17,18	17,11	
C1 19-07 CA AP28B4	28	0,06	18,89	18,81	
C1 19-07 CA AP28B5	28	0,01	16,04	15,98	
C1 19-07 CA AP28B6	28	0,12	22,30		Deslocamento
C1 19-07 CA AP28C1	28	0,03	17,18	17,11	
C1 19-07 CA AP28C2	28	0,05	18,32	18,24	
C1 19-07 CA AP28D1	28	-0,02	14,34	14,28	
C1 19-07 CA AP28D2	28	-0,01	14,91	14,85	

Parâmetros estatísticos painéis	
Painel A (CU) - 28 dias \bar{X} = 15,3 s = 3,00 cv = 19,6% Teste de normalidade $T_1 = 1,54$ $T_2 = 1,10$ $t_{5\%} = 1,89$ Comprovação $T_1 < t_{5\%}$ Não se descartam $T_2 < t_{5\%}$ valores	Painel B (CA) - 28 dias \bar{X} = 17,6 s = 1,76 cv = 10,0% Teste de normalidade $T_1 = 1,35$ $T_2 = 0,90$ $t_{5\%} = 1,72$ Comprovação $T_1 < t_{5\%}$ Não se descartam $T_2 < t_{5\%}$ valores
Painel C (CA) - 28 dias \bar{X} = 17,7 s = 0,80 cv = 4,5% Teste de normalidade $T_1 = 0,71$ $T_2 = 0,71$ $t_{5\%} = 1,16$ Comprovação $T_1 < t_{5\%}$ Não se descartam $T_2 < t_{5\%}$ valores	Painel D (CA) - 28 dias \bar{X} = 14,6 s = 0,40 cv = 2,7% Teste de normalidade $T_1 = 0,71$ $T_2 = 0,71$ $t_{5\%} = 1,16$ Comprovação $T_1 < t_{5\%}$ Não se descartam $T_2 < t_{5\%}$ valores

(1) Os valores com observações foram descartados para o análise estatística devido ao possível deslocamento do material não aderente.

Tabela 5.41 – Parâmetros estatísticos para lotes da análise de valores de tensão máxima de aderência SBPULOT -28 dias Concretagem 1.

**ENSAIOS SBPULOT (STEEL BAR PULL-OUT TEST)
CONCRETAGEM 01**

Referências

CU: Cura úmida

CA: Cura pela aspersão

\bar{X} : valor médio (MPa)

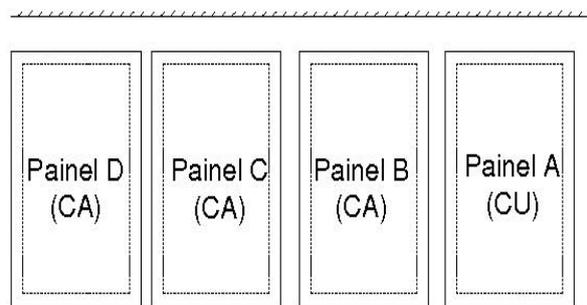
s: desvio padrão (MPa)

cv: coeficiente de variação

T_1 : parâmetro superior

T_2 : parâmetro inferior

$t_{5\%}$: parâmetro de comparação ao nível 5% (ASTM E178-08)



Identificação	Idade (dias)	Parâmetros estatísticos lotes	
C1 19-07 CU AP28A1	28	CU (Painel A) - 28 dias	
C1 19-07 CU AP28A2	28	\bar{X} =	15,3
C1 19-07 CU AP28A3	28	s=	3,00
C1 19-07 CU AP28A4	28	cv=	19,61%
C1 19-07 CU AP28A5	28	Teste de normalidade	
C1 19-07 CU AP28A6	28	Parâmetros	$T_1 = 1,5$
C1 19-07 CA AP28B1	28		$T_2 = 1,10$
C1 19-07 CA AP28B2	28		$t_{5\%} = 1,89$
C1 19-07 CA AP28B3	28	Comprovação	$T_1 < t_{5\%}$
C1 19-07 CA AP28B4	28		$T_2 < t_{5\%}$
C1 19-07 CA AP28B5	28	CA (Painéis B, C y D) - 28 dias	
C1 19-07 CA AP28B6	28	\bar{X} =	16,9
C1 19-07 CA AP28C1	28	s=	1,86
C1 19-07 CA AP28C2	28	cv=	11,0%
C1 19-07 CA AP28D1	28	Teste de normalidade	
C1 19-07 CA AP28D2	28	Parâmetros	$T_1 = 1,63$
			$T_2 = 1,42$
			$t_{5\%} = 2,22$
		Comprovação	$T_1 < t_{5\%}$
			$T_2 < t_{5\%}$
			Descarta-se 1 valor

Tabela 5.42 – Resumo de valores de tensão máxima de aderência de SBPULOT -Concretagem 1

Tensão máxima de aderência (MPa)					
Painel	A	B	C	D	
Tipo de cura	CU	CA	CA	CA	
Idade (dias)	3	11.1	13.9	13.3	12.2
	5	13.2	16.1	16.4	15.4
	7	14.9	16.5	14.1	14.6
	28	15.3	17.6	17.7	14.6

A tensão máxima de aderência para os painéis A e B curados com cura térmica e aspersão apresentaram entre os 3 e 28 dias um aumento da tensão de aderência. Os painéis C e D, com cura no ar, não apresentaram aumento na tensão de aderência na idade de 7 dias. As variações, em geral, estão compreendidas entre 3,8 % e 19,6 %.

5.3.2.5 Contrastes de variâncias e médias das amostras

Como explicado no item 5.3.1 foram feitos os testes F e de Student para contrastar variâncias e médias entre as amostras previamente ao estabelecimento de relações entre a resistência à compressão simples e a tensão máxima de aderência.

As análises foram feitas em dois grupos: o primeiro formado por todos os resultados obtidos para 3, 5 e 7 dias de cada tipo de ensaio realizado, este grupo é denominado dos primeiros dias. O segundo grupo é conformado pelos resultados obtidos aos 28 dias. A seguir listam-se as distintas combinações consideradas:

- a) contrastes entre curas úmida e no ambiente / pela aspersão,
 - Resistência à compressão simples em corpos de prova cilíndricos;
 - Resistência à compressão simples em testemunhos extraídos de painéis;
 - Tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT;
 - Tensão máxima de aderência SBPULOT em painéis;
- b) contrastes entre resistências à compressão simples em corpos de prova cilíndricos e em testemunhos;
- c) contrastes entre tensões máximas de aderência em corpos de prova,

- CAPULOT e SBPULOT em painéis;
- CAPULOT e resistência à compressão simples em testemunhos;
- SBPULOT em painéis e resistência à compressão simples em testemunhos.

5.3.2.5.1 Contraste de resultados às primeiras idades (3, 5 e 7 dias)

A Tabela 5.43 apresenta os resultados dos contrastes de variâncias e médias entre as diferentes variáveis medidas das amostras obtidas na Concretagem 1 às primeiras idades, ou seja, aos 3, 5 e 7 dias.

Tabela 5.43 – Resumo de resultados de testes “F” e “t” às primeiras idades - Concretagem 1

Concretagem	Ensaio	Lotes	Valores médios (MPa)	Resistência CPs				Resistência Testemunhos				Tensão de aderência CAPULOT				Tensão de aderência SBPULOT	
				CU		CA		CU		CA		CU		CA		CU	
				Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t
Concretagem 1	Resistência CPs	CU	28.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA	25.3	Ac.Ho	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
	Resistência Testemunhos	CU	29.1	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA	26.4	0.92	Sem diferenças		0.91	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
	Tensão de aderência CAPULOT	CU	15.5	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	
		CA	15.9	---	---	---	---	0.55	0.60	Sem diferenças		---	---	---	---	---	
	Tensão de aderência SBPULOT	CU	13.1	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	
		CA	14.7	---	---	---	---	0.45	0.50	0.85	0.82	---	---	---	---	---	
					---	---	0.51	0.56	Sem diferenças		0.93	1.13	---	---	---	---	

O termo “Ac.Ho” indicado na tabela acima significa que a hipótese nula é aceita. Já o termo “Ro” significa que se rejeita a hipótese nula de acordo com os critérios expostos no item 5.3.1. e 5.3.1.3.

As tabelas a seguir, as quais foram extraídas após utilização do *software* STATÍSTICA®, de versão 12, que foi empregado para fazer os testes, explicam o procedimento seguido nos mesmos.

No caso da combinação entre as resistências à compressão simples dos corpos de prova moldados com cura úmida e os corpos de prova moldados com cura no ambiente, nas células pintadas em vermelho na tabela acima, o teste “F” determina um p-valor igual a 0,91, conforme Tabela 5.44 para f_c CPs CU versus f_c CPs CA. Então, sendo este valor superior a 0,05, se aceita a hipótese nula, ou seja, se considera que não há diferenças significativas entre as variâncias das amostras.

Tabela 5.44 – Teste “F” para f_c CPs CU vs. f_c CPs CA

Group 1 vs. Group 2	F-test for Independent Samples (C1 3-5-7dias.sta)					
	Valid N Group 1	Valid N Group2	Std.Dev. Group 1	Std.Dev. Group2	F-ratio Variances	p Variances
f_c CPs CU (MPa) vs. f_c CPs CA (MPa)	18	18	2.72	2.65	1.06	0.9111

Em seguida foi realizado o teste de Student, que determina um p-valor igual a 0,002, apresentado na Tabela 5.45 para f_c CPs CU versus f_c CPs CA. Então, sendo o p-valor inferior a 0,05, rejeita-se a hipótese nula, ou seja, se considera que as diferenças entre as médias das amostras são significativas.

Tabela 5.45 – Teste “t” para f_c CPs CU vs. f_c CPs CA

Group 1 vs. Group 2	T-test for Independent Samples (C1 3-5-7dias.sta)				
	Mean Group 1	Mean Group 2	t-value	df	p
f_c CPs CU (MPa) vs. f_c CPs CA (MPa)	30.2	27.1	3.40	34	0.00172

Com estes resultados é possível fazer uma relação entre as médias das amostras consideradas. Pode-se então dividir as medias das resistências à compressão simples dos CPs curados com cura no ambiente e igual a 25,3 MPa, pelos CPs curados com cura úmida, de 28,8 MPa, resultando um valor de 0,88, conforme pintado em vermelho na Tabela 5.43.

Nos casos onde a hipótese nula do teste de Student é rejeitada, não é possível estabelecer uma relação entre as médias das amostras consideradas, porque não há diferenças significativas entre elas. Isso é indicado como “Sem diferenças” na tabela de resumo, como é o caso da

relação entre resistência à compressão em testemunhos e resistência à compressão em corpos de prova com cura úmida e com cura no ambiente ou pela aspersão. Isso também se aplica nos casos da relação entre tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT com cura úmida e com cura no ambiente e nos casos da relação entre tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT e em painéis SBPULOT com cura úmida.

No entanto, pode-se ver que é possível estabelecer relações entre a resistência à compressão simples dos testemunhos e os valores de tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT e em painéis SBPULOT.

Nos APÊNDICES A a F pode-se consultar o teste “F” e teste “t” feitos para cada uma das combinações indicadas previamente e para cada concretagem realizada.

A seguir se apresentam as Tabela 5.46, Tabela 5.47, Tabela 5.48, Tabela 5.49 e Tabela 5.50 dos resumos de resultados dos contrastes de variâncias e médias correspondentes às concretagens, respectivamente, 2, 3, 4, 5 e 6 às primeiras idades.

Tabela 5.46 – Resumo de resultados de testes “F” e “t” às primeiras idades - Concretagem 2

Concretagem	Ensaio	Lotes	Valores médios (MPa)	Resistência CPs				Resistência Testemunhos				Tensão de aderência CAPULOT				Tensão de aderência SBPULOT	
				CU		CA		CU		CA		CU		CA		CU	
				Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t
Concretagem 2	Resistência CPs	CU	29.9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA	23.6	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
	Resistência Testemunhos	CU	34.1	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA	29.5	Sem diferenças		1.25		0.87		---		---		---		---	
	Tensão de aderência CAPULOT	CU	16.3	---	---	---	---	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	---	---	---	---	---	
		CA	15.3	---	---	---	---	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	
	Tensão de aderência SBPULOT	CU	15.1	---	---	---	---	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	
		CA	17.5	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	

Tabela 5.47 – Resumo de resultados de testes “F” e “t” às primeiras idades- Concretagem 3

Concretagem	Ensaio	Lotes	Valores médios (MPa)	Resistência CPs				Resistência Testemunhos				Tensão de aderência CAPULOT				Tensão de aderência SBPULOT	
				CU		CA		CU		CA		CU		CA		CU	
				Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t
Concretagem 3	Resistência CPs	CU	31.4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
		CA		Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Resistência Testemunhos	CU	35.8	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
		CA		Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---
	Tensão de aderência CAPULOT	CU	16.5	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---
		CA		---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---
	Tensão de aderência SBPULOT	CU	19.7	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---
		CA		---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ro.
					0.88		Sem diferenças		0.74								
					0.46		0.51		---								
					0.44		0.48		Sem diferenças								
					1.14		1.20		---								
				0.81		---		---									
				0.89		Sem diferenças		---									
				0.80		Sem diferenças		0.90									
				0.91		---		---									
				0.46		0.51		---									
				0.44		0.48		Sem diferenças									
				0.55		0.61		1.19		1.25		---					
				0.41		0.45		0.88		Sem diferenças		0.74					

Tabela 5.48 – Resumo de resultados de testes “F” e “t” às primeiras idades - Concretagem 4.

Concretagem	Ensaio	Lotes	Valores médios (MPa)	Resistência CPs				Resistência Testemunhos				Tensão de aderência CAPULOT				Tensão de aderência SBPULOT	
				CU		CA		CU		CA		CU		CA		CU	
				Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t
Concretagem 4	Resistência CPs	CU	27.5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
		CA		Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Resistência Testemunhos	CU	24.4	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
		CA		Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---
	Tensão de aderência CAPULOT	CU	15.1	---	---	---	---	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---
		CA		---	---	---	---	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---
	Tensão de aderência SBPULOT	CU	13.9	---	---	---	---	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---
		CA		---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.
					0.58		0.65		Sem diferenças		Sem diferenças		Sem diferenças				
					0.62		0.69		---								
					0.58		0.65		Sem diferenças								
					0.81		---		---								
				0.89		Sem diferenças		---									
				0.80		Sem diferenças		0.90									
				0.91		---		---									
				0.46		0.51		---									
				0.44		0.48		Sem diferenças									
				0.55		0.61		1.19		1.25		---					
				0.41		0.45		0.88		Sem diferenças		0.74					

Tabela 5.49 – Resumo de resultados de testes “F” e “t” às primeiras idades- Concretagem 5

Concretagem	Ensaio	Lotes	Valores médios (MPa)	Resistência CPs				Resistência Testemunhos				Tensão de aderência CAPULOT				Tensão de aderência SBPULOT	
				CU		CA		CU		CA		CU		CA		CU	
				Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t
Concretagem 5	Resistência CPs	CU	17.4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA	15.9	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
	Resistência Testemunhos	CU	15.0	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA	14.5	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	
	Tensão de aderência CAPULOT	CU	10.2	---	---	---	---	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	---	---	---	---	---	
		CA	9.7	---	---	---	---	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	
	Tensão de aderência SBPULOT	CU	8.4	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ro.	Ro.	---	
		CA	6.5	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	
					0.91		---		---		---		---		---		
					0.86		0.95		---		---		---		---		
					0.83		0.91		0.97		---		---		---		
					---		---		0.68		0.70		---		---		
				---		---		0.65		0.67		Sem diferenças		---			
				---		---		0.56		0.58		0.82		0.86			
				---		---		0.43		0.45		0.64		0.67			
				---		---		---		---		---		---			

Tabela 5.50 – Resumo de resultados de testes “F” e “t” às primeiras idades da Concretagem 6

Concretagem	Ensaio	Lotes	Valores médios (MPa)	Resistência CPs				Resistência Testemunhos				Tensão de aderência CAPULOT				Tensão de aderência SBPULOT	
				CU		CA		CU		CA		CU		CA		CU	
				Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t
Concretagem 6	Resistência CPs	CU	15.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA	14.9	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
	Resistência Testemunhos	CU	14.6	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA	12.9	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	
	Tensão de aderência CAPULOT	CU	8.3	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	
		CA	10.5	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	
	Tensão de aderência SBPULOT	CU	6.4	---	---	---	---	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	---	
		CA	6.8	---	---	---	---	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	
					Sem diferenças		---		---		---		---		---		
					---		---		0.57		0.64		---		---		
					---		---		0.72		0.81		1.27		---		
					---		---		0.44		0.50		0.77		0.61		
				---		---		0.47		0.53		0.82		0.65			
				---		---		---		---		---		Sem diferenças			

5.3.2.5.2 Contraste de resultados aos 28 dias

A Tabela 5.51 mostra os resultados dos contrastes de variâncias e médias entre as diferentes variáveis medidas das amostras obtidas na Concretagem 1 aos 28 dias. Os testes foram feitos do mesmo jeito que os correspondentes às primeiras idades.

Tabela 5.51 – Resumo de resultados de testes “F” e “t” aos 28 dias - Concretagem 1

Concretagem	Ensaio	Lotes	Valores médios (MPa)	Resistência CPs				Resistência Testemunhos				Tensão de aderência CAPULOT				Tensão de aderência SBPULOT	
				CU		CA		CU		CA		CU		CA		CU	
				Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t
Concretagem 1	Resistência CPs	CU	28.8	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
				---		---		---		---		---		---			
		CA	25.3	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
				0.88		---		---		---		---		---			
	Resistência Testemunhos	CU	29.1	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
				1.01		1.15		---		---		---		---			
		CA	26.4	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---	---	---	---	---
				0.92		Sem diferenças		Sem diferenças		---		---		---			
	Tensão de aderência CAPULOT	CU	15.5	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---
				---		---		0.53		0.59		---		---			
		CA	15.9	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---
				---		---		0.55		0.60		Sem diferenças		---			
Tensão de aderência SBPULOT	CU	13.1	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	
			---		---		0.45		0.50		0.85		Sem diferenças		---		
	CA	14.7	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	
			---		---		0.51		0.56		0.95		Sem diferenças		Sem diferenças		

Pode-se comprovar que também neste caso, é possível estabelecer relações entre a resistência à compressão simples dos testemunhos e os valores de tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT e em painéis SBPULOT. Também se comprova neste caso que não há diferenças significativas entre os resultados obtidos em corpos de prova CAPULOT com cura úmida e cura no ambiente.

A seguir se apresentam as Tabela 5.52, Tabela 5.53, Tabela 5.54, Tabela 5.55 e Tabela 5.56 contendo os resumos de resultados dos contrastes de variâncias e médias correspondentes às concretagens, respectivamente, 2, 3, 4, 5 e 6 aos 28 dias.

Tabela 5.52 – Resumo de resultados de testes “F” e “t” aos 28 dias - Concretagem 2

Concretagem	Ensaio	Lotes	Valores médios (MPa)	Resistência CPs				Resistência Testemunhos				Tensão de aderência CAPULOT				Tensão de aderência SBPULOT	
				CU		CA		CU		CA		CU		CA		CU	
				Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t
Concretagem 2	Resistência CPs	CU	29,9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA	23,6	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
				0,79	---		---		---		---		---		---		
	Resistência Testemunhos	CU	34,1	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA	29,5	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---	---	---	---	
				Sem diferenças		1,44		---		---		---		---		---	
	Tensão de aderência CAPULOT	CU	16,3	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	
		CA	15,3	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	
				---		---		0,48		0,55		---		---		---	
	Tensão de aderência SBPULOT	CU	15,1	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---
		CA	17,5	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.
				---		---		0,44		0,51		0,93		Sem diferenças		---	
			---		---		0,51		0,59		1,07		1,15		Sem diferenças		

Tabela 5.53 – Resumo de resultados de testes “F” e “t” aos 28 dias - Concretagem 3

Concretagem	Ensaio	Lotes	Valores médios (MPa)	Resistência CPs				Resistência Testemunhos				Tensão de aderência CAPULOT				Tensão de aderência SBPULOT	
				CU		CA		CU		CA		CU		CA		CU	
				Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t
Concretagem 3	Resistência CPs	CU	31,4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA	29,8	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
				0,95	---		---		---		---		---		---		
	Resistência Testemunhos	CU	35,8	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA	32,4	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	---	---	---	---	---	---	---	
				1,14		1,20		---		---		---		---		---	
	Tensão de aderência CAPULOT	CU	16,5	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	
		CA	15,7	---	---	---	---	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	
				---		---		0,46		0,51		---		---		---	
	Tensão de aderência SBPULOT	CU	19,7	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	---	---
		CA	14,6	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.
				---		---		0,55		0,61		Sem diferenças		Sem diferenças		---	
			---		---		0,41		0,45		Sem diferenças		Sem diferenças		Sem diferenças		

Tabela 5.54 – Resumo de resultados de testes “F” e “t” aos 28 dias - Concretagem 4

Concretagem	Ensaio	Lotes	Valores médios (MPa)	Resistência CPs				Resistência Testemunhos				Tensão de aderência CAPULOT				Tensão de aderência SBPULOT	
				CU		CA		CU		CA		CU		CA		CU	
				Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t
Concretagem 4	Resistência CPs	CU	27.5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA		Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
				22.2	0.81		---		---		---		---		---		
	Resistência Testemunhos	CU	24.4	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA		Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---	---	---	---	
				22.0	0.80		Sem diferenças		Sem diferenças		---		---		---		
	Tensão de aderência CAPULOT	CU	15.1	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	
		CA		---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	
				14.2	---		0.58		0.65		Sem diferenças		---		---		
	Tensão de aderência SBPULOT	CU	13.9	---	---	---	---	Ro.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	
		CA		---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	
				14.2	---		0.58		0.65		Sem diferenças		Sem diferenças		Sem diferenças		

Tabela 5.55 – Resumo de resultados de testes “F” e “t” aos 28 dias - Concretagem 5

Concretagem	Ensaio	Lotes	Valores médios (MPa)	Resistência CPs				Resistência Testemunhos				Tensão de aderência CAPULOT				Tensão de aderência SBPULOT	
				CU		CA		CU		CA		CU		CA		CU	
				Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t
Concretagem 5	Resistência CPs	CU	17.4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---		
		CA		Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---		
				15.9	0.91		---		---		---		---		---		
	Resistência Testemunhos	CU	15.0	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	---	---	---		
		CA		Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---	---	---		
				14.5	Sem diferenças		0.91		Sem diferenças		---		---		---		
	Tensão de aderência CAPULOT	CU	10.2	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---		
		CA		---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---		
				9.7	---		0.65		0.67		Sem diferenças		---		---		
	Tensão de aderência SBPULOT	CU	8.4	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	
		CA		---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ro.	
				6.5	---		0.43		0.45		Sem diferenças		Sem diferenças		0.78		

Tabela 5.56 – Resumo de resultados de testes “F” e “t” aos 28 dias - Concretagem 6

Concretagem	Ensaio	Lotes	Valores médios (MPa)	Resistência CPs				Resistência Testemunhos				Tensão de aderência CAPULOT				Tensão de aderência SBPULOT	
				CU		CA		CU		CA		CU		CA		CU	
				Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t	Teste F	Teste t
Concretagem 6	Resistência CPs	CU	15.2	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA		Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
	Resistência Testemunhos	CU	14.6	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---	---	---	---	---	---	
		CA		Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	---	---	---	---	
	Tensão de aderência CAPULOT	CU	8.3	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	---	---	---	---	
		CA		---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ac.Ho.	---	---	---	
	Tensão de aderência SBPULOT	CU	6.4	---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	---	
		CA		---	---	---	---	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	Ro.	Ac.Ho.	

Como se pôde comprovar a partir dos resultados obtidos de todos os eventos de concretagem realizados neste trabalho, é possível estabelecer relações entre a resistência à compressão simples dos testemunhos e os valores de tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT (*Cube Appropriate Pull-Out Test*) e em painéis SBPULOT (*Steel Bar Pull-Out Test*).

No referente à cura dos CPs, os CAPULOT e os painéis, conforme as análises feitas, é possível afirmar que o tipo de cura tem influência significativa na resistência dos CPs às primeiras idades e aos 28 dias. Entretanto, nos testemunhos extraídos dos painéis mostram influência significativa da cura nas primeiras idades, mais não aos 28 dias. Os resultados obtidos dos ensaios CAPULOT e SBPULOT mostram que a cura não tem influência na tensão de aderência nem às primeiras idades nem aos 28 dias. Isto se justifica pelo fato de que a cura atinge o concreto localizado em uma espessura entre 5 mm e 20 mm abaixo da superfície de acordo a ACI 308R-16. Como a barra dos corpos de prova CAPULOT estão localizadas entre 30 á 46 mm das superfícies, o concreto aderido a ela não é influenciado pela cura.

5.3.2.6 Relação entre ensaios em moldes CAPULOT e in-loco SBPULOT

Após da análise anterior, foram agrupados os resultados obtidos dos CAPULOT com cura úmida e cura no ambiente para cada idade de ensaio, sendo o mesmo realizado com resultados dos SBPULOT. Com o novo grupo de dados foram repetidos os testes *t* e *F*. Os resultados mostram-se nas Tabelas 5.57 e 5.58 nas primeiras idades e á 28 dias respetivamente.

Tabela 5.57 – Análise estatística de resultados CAPULOT e SBPULOT nas primeiras idades

Lote	Ensaio	Idade: 3 dias			Idade: 5 dias			Idade: 7 dias		
		Valor médio (MPa)	Testes		Valor médio (MPa)	Testes		Valor médio (MPa)	Testes	
			F	t		F	t		F	t
C1	Tensão de aderência CAPULOT	13,9	Ac.Ho.	Ac.Ho.	17,8	Ac.Ho.	Ac.Ho.	17,0	Ac.Ho.	Rej.Ho.
	Sem diferenças		1,13			1,08				
C1	Tensão de aderência SBPULOT	13,2	---	---	15,8	---	---	15,7	---	---
	---		---			---				
C2	Tensão de aderência CAPULOT	14,9	Ac.Ho.	Ac.Ho.	17,5	Ac.Ho.	Ac.Ho.	16,8	Ac.Ho.	Ac.Ho.
	Sem diferenças		Sem diferenças			Sem diferenças				
C2	Tensão de aderência SBPULOT	15,1	---	---	16,9	---	---	16,0	---	---
	---		---			---				
C3	Tensão de aderência CAPULOT	16,5	Ac.Ho.	Ac.Ho.	15,2	Ac.Ho.	Rej.Ho.	18,4	Rej.Ho.	Ac.Ho.
	Sem diferenças		0,70			Sem diferenças				
C3	Tensão de aderência SBPULOT	16,9	---	---	21,7	---	---	18,7	---	---
	---		---			---				
C4	Tensão de aderência CAPULOT	14,0	Ac.Ho.	Ac.Ho.	15,6	Ac.Ho.	Ac.Ho.	16,0	Rej.Ho.	Ac.Ho.
	Sem diferenças		Sem diferenças			Sem diferenças				
C4	Tensão de aderência SBPULOT	14,0	---	---	13,9	---	---	15,7	---	---
	---		---			---				
C5	Tensão de aderência CAPULOT	7,0	Ac.Ho.	Ac.Ho.	8,8	Ac.Ho.	Rej.Ho.	13,7	Rej.Ho.	Rej.Ho.
	Sem diferenças		1,29			1,74				
C5	Tensão de aderência SBPULOT	8,0	---	---	6,8	---	---	7,9	---	---
	---		---			---				
C6	Tensão de aderência CAPULOT	9,9	Rej.Ho.	Rej.Ho.	8,1	Rej. Ho	Rej.Ho	9,8	Rej.Ho	Rej.Ho
	---		1,29			1,42				
C6	Tensão de aderência SBPULOT	6,7	---	---	6,3	---	---	6,9	---	---
	---		---			---				

Nas primeiras idades os Lotes C1 a C4 não mostram diferenças significativas entre resultados de CAPULOT e SBPULOT num 75% dos casos analisados. Os lotes C5 e C6 correspondem a concretos não estruturais e mostram diferenças significativas num 67% dos casos.

Tabela 5.58 – Análise estatística de resultados CAPULOT e SBPULOT á 28 dias

Lotes	Ensaio	Valor médio (MPa)	Testes	
			F	t
C1	Tensão de aderência CAPULOT	19,6	Ac.Ho.	Rej.Ho.
			1,16	
C1	Tensão de aderência SBPULOT	16,8	---	---

C2	Tensão de aderência CAPULOT	20,6	Ac.Ho.	Rej.Ho.
			1,14	
C2	Tensão de aderência SBPULOT	18,0	---	---

C3	Tensão de aderência CAPULOT	16,9	Ac.Ho.	Ac.Ho.
			Sem diferenças	
C3	Tensão de aderência SBPULOT	18,9	---	---

C4	Tensão de aderência CAPULOT	15,4	Ac.Ho.	Ac.Ho.
			Sem diferenças	
C4	Tensão de aderência SBPULOT	14,0	---	---

C5	Tensão de aderência CAPULOT	9,59	Ac.Ho.	Ac.Ho.
			Sem diferenças	
C5	Tensão de aderência SBPULOT	9,50	---	---

C6	Tensão de aderência CAPULOT	11,3	Ac.Ho.	Rej.Ho.
			1,47	
C6	Tensão de aderência SBPULOT	7,68	---	---

Aos 28 dias os Lotes C1 a C4 mostram diferenças significativas entre resultados de CAPULOT e SBPULOT num 50% dos casos analisados. O mesmo acontece com os lotes C5 e C6

Também foram analisadas as diferenças entre os dois tipos de ensaio. O diagrama de caixas da Figura 5.2 apresenta as diferenças entre os resultados dos CAPULOT e SBPULOT das primeiras idades (3, 5 e 7 dias) para cada um dos eventos. A linha de pontos representa a resistência à compressão obtida nos CPs aos 3 dias de idade.

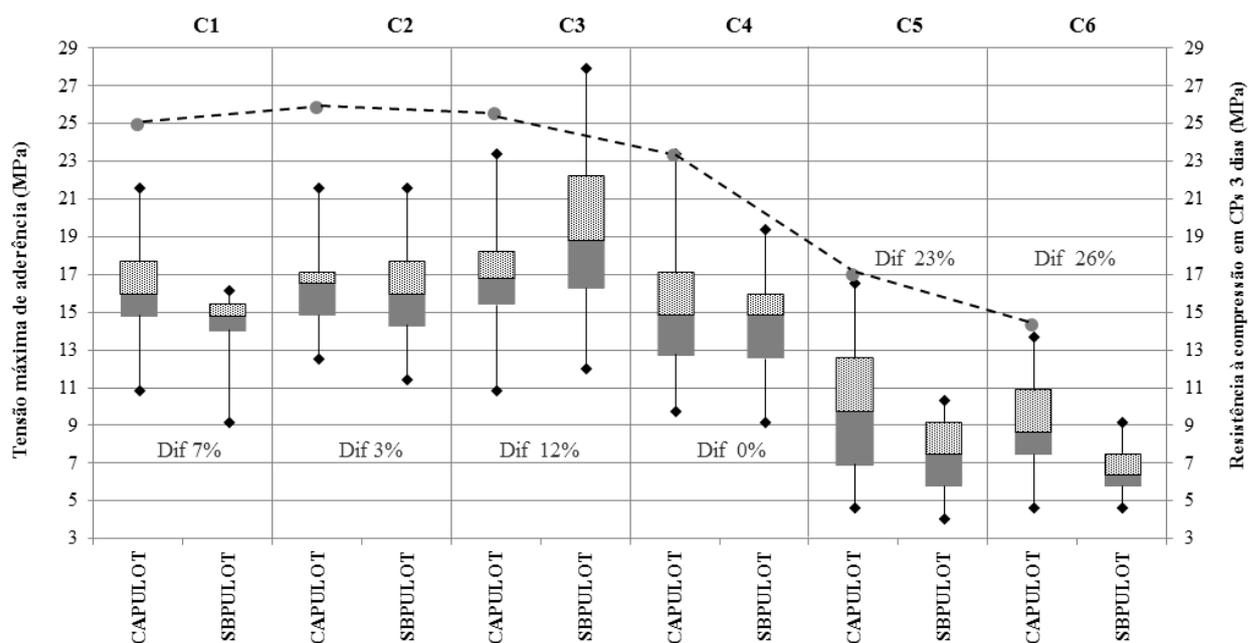


Figura 5.2 – Diferenças entre resultados CAPULOT e SBPULOT nas primeiras idades

Pode-se comprovar que as diferenças relativas maiores a 20% ocorrem nos lotes com resistência mais baixa (na ordem de 15 MPa). Os concretos com resistência superior a 20MPa apresentaram diferenças relativamente inferiores, com uma média de 5,5%. Dessa forma, comprova-se que o CAPULOT pode ser empregado para estimar a resistência “in loco” nas primeiras idades de concretos de f_c igual ou maior a 20 MPa.

5.3.2.7 Análise de correlação simples

A partir dos resultados dos contrastes podem-se estabelecer correlações entre as variáveis de resistência à compressão simples e a tensão máxima de aderência. A seguir é apresentado o resumo de valores de resistência à compressão simples em testemunhos e a tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT obtidos conforme nos procedimentos explicados, respectivamente, nos itens 5.3.2.2 e 5.3.2.3. Os valores correspondem a todos os obtidos em cada evento de concretagem, ou seja, em cada uma das seis, aos 3, 5, 7 e 28 dias e para curas no ar e úmida, conforme Tabela 5.59.

Tabela 5.59 – Resumo geral de valores obtidos de resistência à compressão simples e de tensão máxima de aderência CAPULOT em testemunhos (continua)

Concretagem	Idade	Tipo de cura	Resistência à compressão simples (MPa)	Tensão máxima de aderência CAPULOT (MPa)
Concretagem 1	3 dias	CU	28,6	10,9
		CA	25,6	10,9
	5 dias	CU	27,2	14,8
		CA	25,9	14,8
	7 dias	CU	31,5	14,8
		CA	27,8	14,8
28 dias	CU	35,5	18,2	
	CA	34,9	18,2	
Concretagem 2	3 dias	CU	30,7	12,0
		CA	25,4	12,0
	5 dias	CU	35,6	14,3
		CA	30,4	14,3
	7 dias	CU	36,0	15,4
		CA	32,7	15,4
28 dias	CU	40,8	18,8	
	CA	38,6	18,8	
Concretagem 3	3 dias	CU	35,7	12,6
		CA	28,3	12,6
	5 dias	CU	37,2	13,2
		CA	33,8	13,2
	7 dias	CU	38,1	16,0
		CA	35,2	16,0
28 dias	CU	46,5	16,5	
	CA	43,3	16,5	
Concretagem 4	3 dias	CU	24,0	11,5
		CA	20,3	11,5
	5 dias	CU	23,8	12,0
		CA	21,8	12,0
	7 dias	CU	25,8	13,2
		CA	23,8	13,2
	28 dias	CU	29,4	14,3
		CA	28,1	14,3

Tabela 5.59 – Resumo geral de valores obtidos de resistência à compressão simples e de tensão última de aderência CAPULOT em testemunhos (continuação)

Concretagem	Idade	Tipo de cura	Resistência à compressão simples (MPa)	Tensão máxima de aderência CAPULOT (MPa)
Concretagem 5	3 dias	CU	13,3	6,4
		CA	12,9	6,4
	5 dias	CU	15,4	8,1
		CA	14,1	8,1
	7 dias	CU	16,5	9,8
		CA	15,5	9,8
	28 dias	CU	24,7	9,8
		CA	24,5	9,8
Concretagem 6	3 dias	CU	13,7	7,5
		CA	10,9	7,5
	5 dias	CU	15,5	7,5
		CA	13,3	7,5
	7 dias	CU	16,4	7,5
		CA	14,5	7,5
	28 dias	CU	23,6	10,9
		CA	22,4	10,9

O resumo apresenta 48 pares de valores de resistência à compressão simples em testemunhos e de tensão máxima de aderência em corpos de prova CAPULOT. Com estes valores foi feito o gráfico que se mostra na Figura 5.3, onde os valores de resistência à compressão simples são situados no eixo horizontal e os valores de tensão máxima de aderência são situados no eixo vertical. A reta corresponde à reta de mínimos quadrados obtida da análise de regressão simples. A análise foi feita também com o *software* STATÍSTICA®, de versão 12.

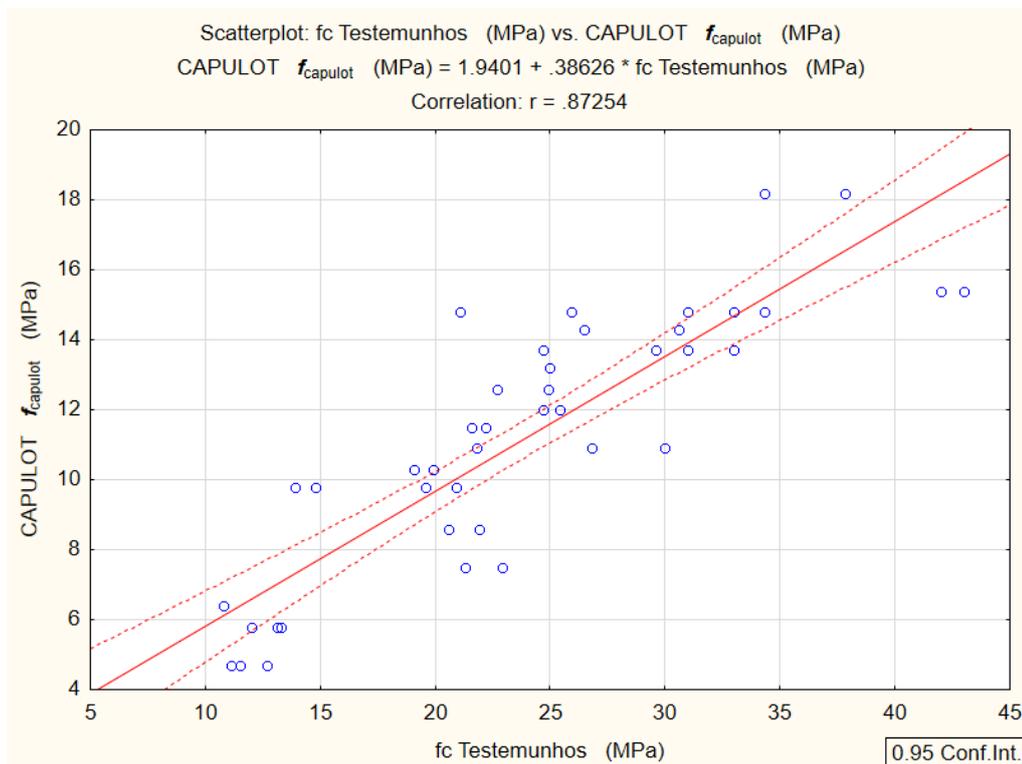


Figura 5.3 – Regressão simples de tensão máxima de aderência e resistência à compressão simples

O valor do coeficiente de correlação entre as variáveis é de 0,87. A Figura 5.4 mostra a reta de regressão e suas paralelas correspondentes ao intervalo igual a duas vezes o desvio padrão. Somente um ponto cai fora do intervalo e foi eliminado da amostra para fazer o gráfico dos valores filtrados apresentados na Figura 5.5. Como pôde-se comprovar o coeficiente de correlação final é de 0,89, superior ao obtido anteriormente. O valor do coeficiente indica uma forte correlação das variáveis estudadas de acordo com a interpretação de Shimakura (2002).

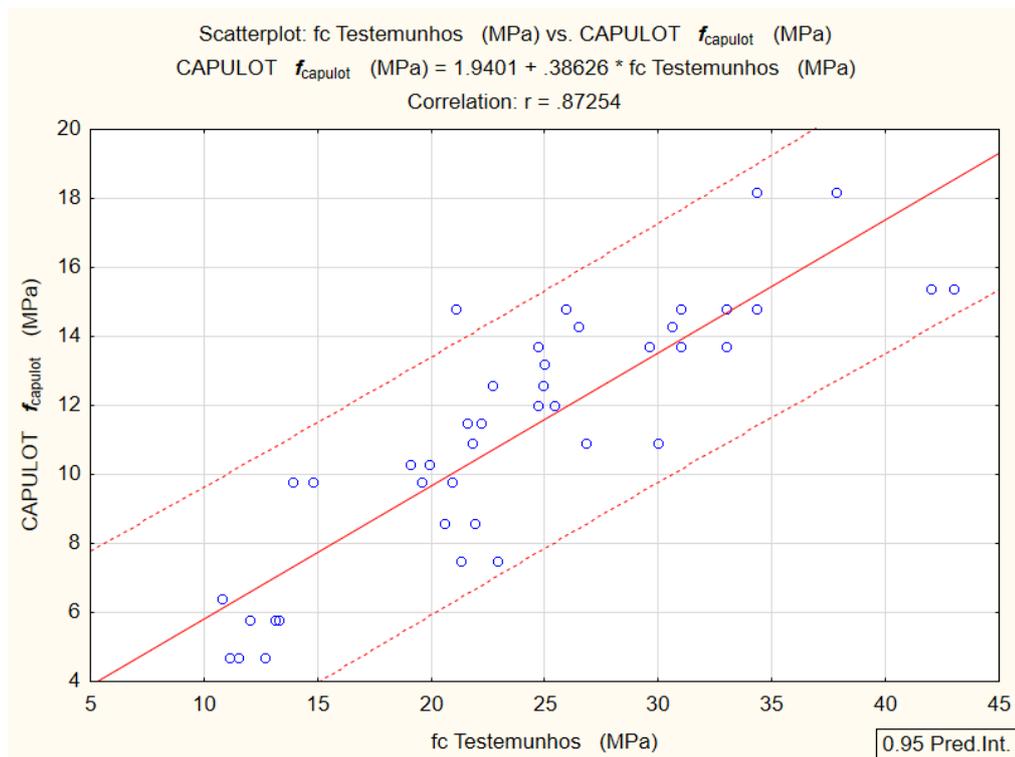


Figura 5.4 – Regressão simples de tensão máxima de aderência e resistência à compressão simples com intervalo de estimação de 95%

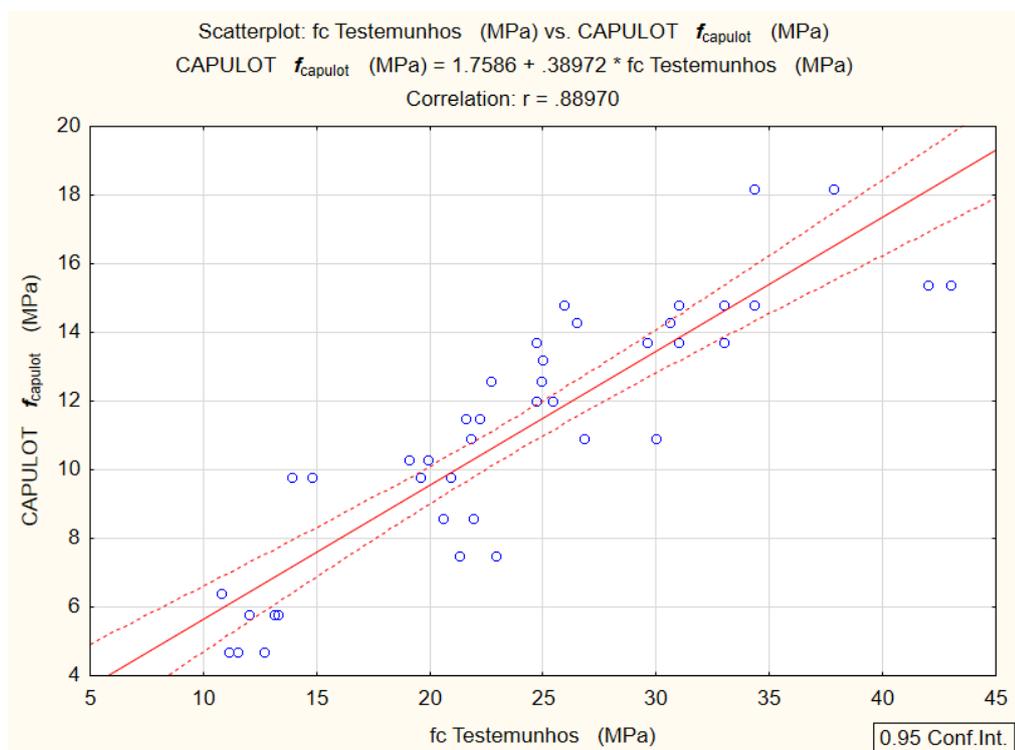


Figura 5.5 – Regressão simples de tensão máxima de aderência e resistência à compressão simples com valores filtrados

Mesmo processo foi feito com a relação entre resultados do CAPULOT e da resistência à compressão simples nos CPs. O coeficiente obtido também indica forte correlação entre as variáveis. A Figura 5.6 mostra a relação obtida dos dados originais.

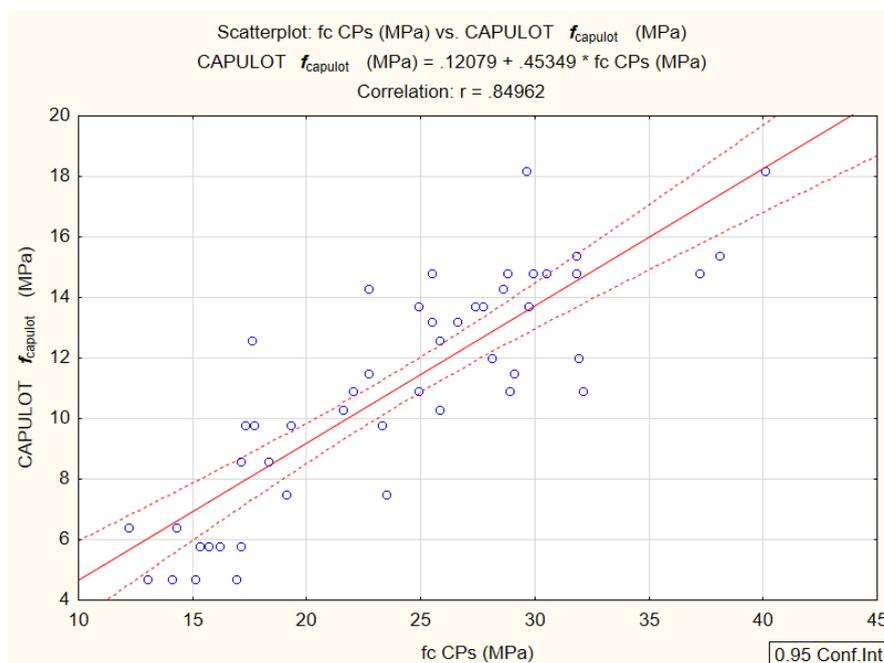


Figura 5.6 – Regressão simples de tensão máxima de aderência e resistência à compressão simples de CPs

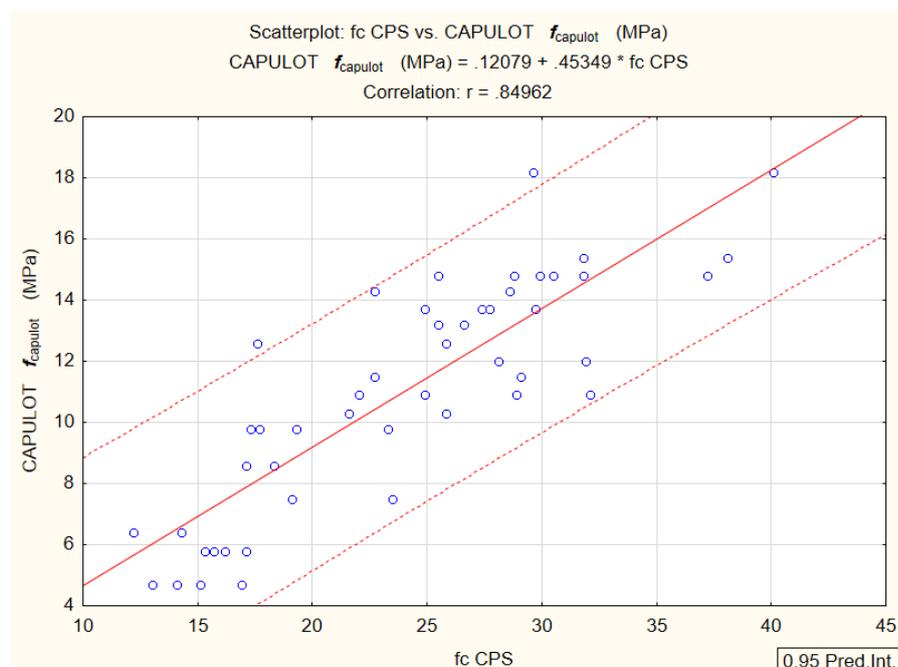


Figura 5.7 – Regressão simples de tensão máxima de aderência e resistência à compressão de CPs com intervalo de estimação de 95%

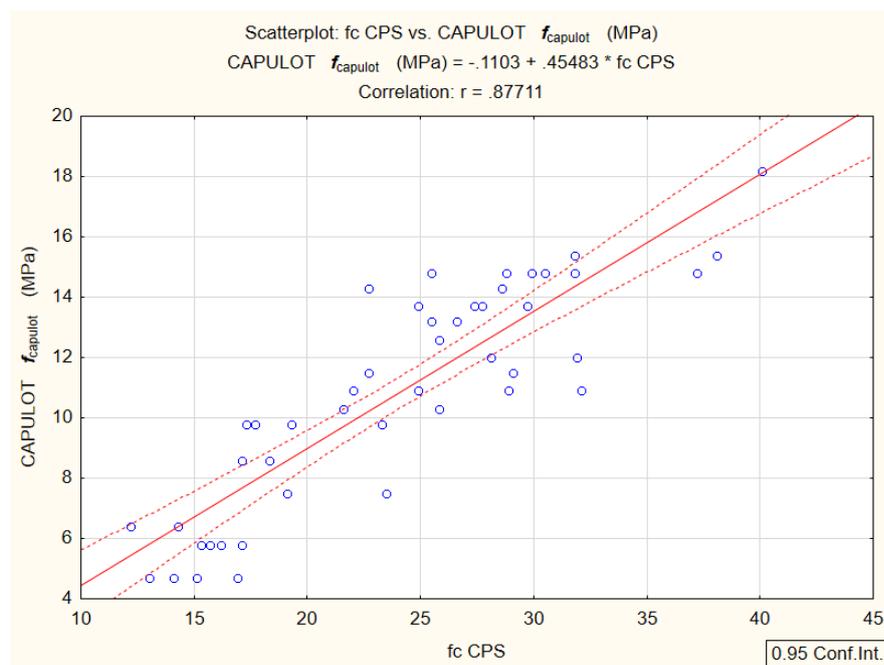


Figura 5.8 – Regressão simples de tensão máxima de aderência e resistência à compressão de CPs com valores filtrados

Neste ponto é importante assinalar a grande similaridade existente entre esta expressão de correlação final comparada com a obtida por Lorrain e Barbosa (2008). A Figura 5.9 apresenta o gráfico com ambas retas de regressão para comparação, em que se pôde comprovar que as retas tendem a ser concorrentes no caso de resistências à compressão elevadas.

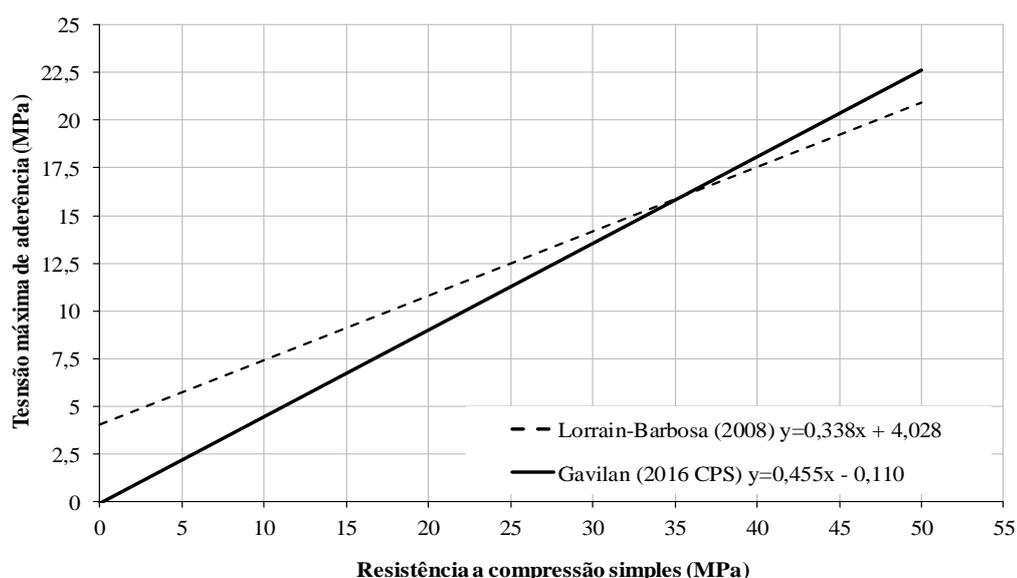


Figura 5.9 – Comparação entre a reta de regressão simples de tensão máxima de aderência e resistência à compressão simples com a obtida por Lorrain e Barbosa (2008)

5.3.2.8 Medições de maturidade em painéis

Como foi explicado no capítulo anterior, os valores de maturidade do concreto dos painéis foram medidos com sensores especiais colocados na metade da espessura dos painéis. Foram colocados dois sensores por cada painel, e as medições foram feitas às idades de 3, 5, 7 e 28 dias. Então, para cada idade e cada painel foi calculada a média das maturidades medidas no painel na idade considerada. A Tabela 5.60 apresenta os valores medidos e as médias calculadas para cada painel e idade, além das variações respectivas. Como se pode comprovar, os pares de valores medidos em cada painel e em cada idade são muito próximos, o que resulta em variações muito pequenas.

Tabela 5.60 – Medições de maturidade em painéis moldados - Concretagem 1

Idade (dias)	Painéis	Tipo de cura	Maturidade °C-hr				
			S1	S2	\bar{X}	s	cv
3	A	CA	2197.5	2315.8	2256.7	83.7	3.71%
3	B	CU	2419.0	2459.9	2439.5	28.9	1.19%
3	C	CU	2386.9	2345.6	2366.3	29.2	1.23%
3	D	CU	2343.8	2340.2	2342.0	2.5	0.11%
5	A	CA	3777.4	3717.1	3747.3	42.6	1.14%
5	B	CU	3961.1	3879.1	3920.1	58.0	1.48%
5	C	CU	3760.6	3842.9	3801.8	58.2	1.53%
5	D	CU	3737.1	3753.6	3745.4	11.7	0.31%
7	A	CA	4766.5	4878.0	4822.3	78.8	1.63%
7	B	CU	4916.4	5000.3	4958.4	59.3	1.20%
7	C	CU	4883.1	5006.9	4945.0	87.5	1.77%
7	D	CU	4918.6	4752.6	4835.6	117.4	2.43%
28	A	CA	20201.2	20493.0	20347.1	206.3	1.01%
28	B	CU	20796.4	20712.5	20754.5	59.3	0.29%
28	C	CU	20594.3	20757.7	20676.0	115.5	0.56%
28	D	CU	20161.0	20285.6	20223.3	88.1	0.44%

Os valores de maturidade apresentam um crescimento progressivo com a idade, como se mostra no gráfico da Figura 5.10, onde se pode ver que as curvas correspondentes a cada painel são coincidentes nas primeiras idades, sendo que, mesmo aos 28 dias, as diferenças entre os painéis são muito pequenas.

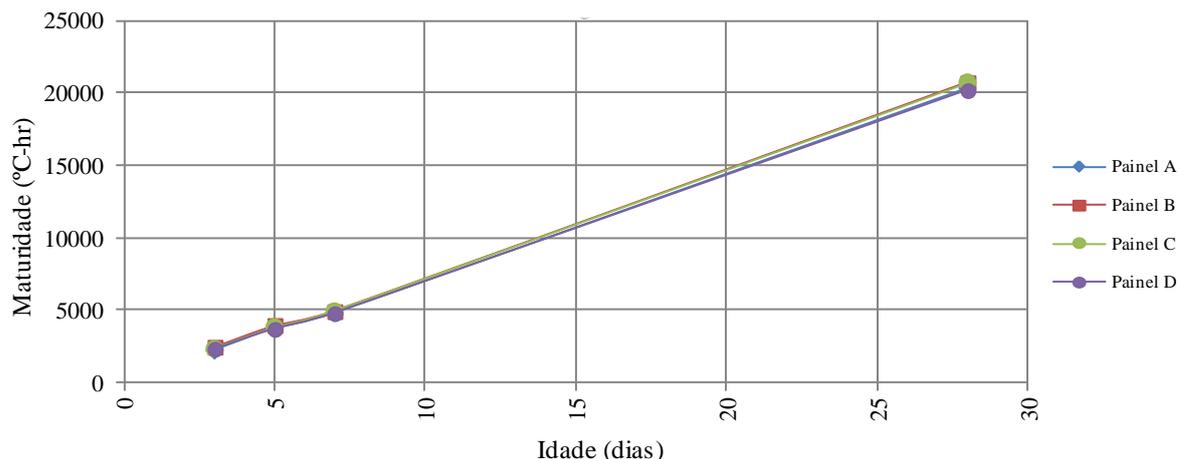


Figura 5.10 – Crescimento da maturidade em painéis moldados - Concretagem 1

Desta forma é possível afirmar que os tipos de cura não tiveram influência no desenvolvimento da maturidade do concreto situado na metade da espessura dos painéis. Os resultados das medições obtidas em todos os concretagens são detalhados nos APÊNDICES A a F com os gráficos correspondentes.

A Figura 5.11 apresenta os valores médios obtidos para cada idade e concretagem. Pode-se observar que os maiores valores de maturidade aparecem em concretos de resistências menores que foram colocados nos meses mais cálidos enquanto que valores inferiores de maturidade aparecem em concretos de resistências maiores que foram colocados nos meses do inverno.

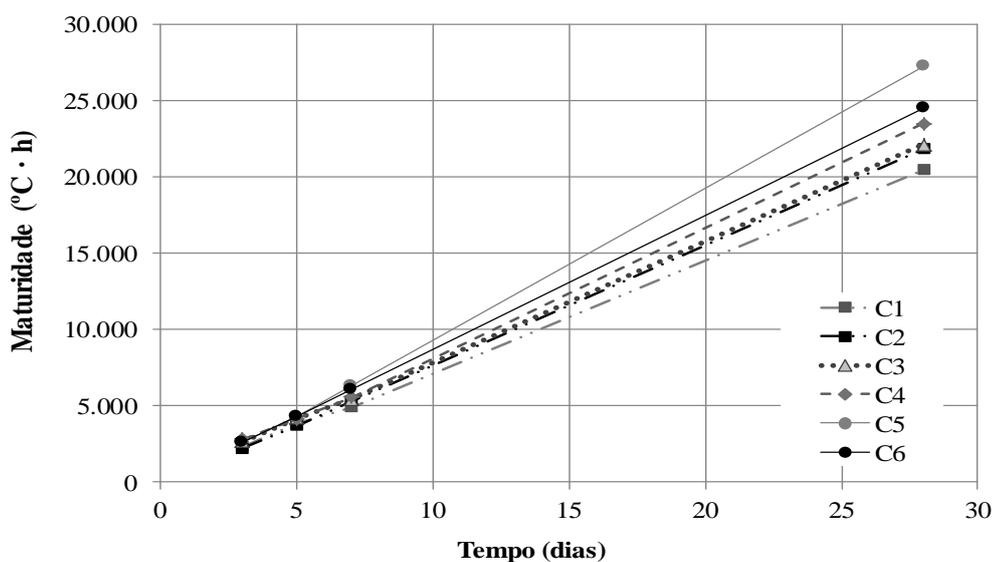


Figura 5.11 – Valores de maturidade obtidas nos 6 concretagens

5.3.2.9. Relação temperatura ambiente e maturidade do concreto

Conforme o detalhado no item 4.4 foi registrada a temperatura ambiente no canteiro de obra num período mínimo de 24 horas após cada concretagem. A Figura 5.12 apresenta as variações térmicas de cada concretagem (no Concretagem 1 o registro não pudo ser feito).

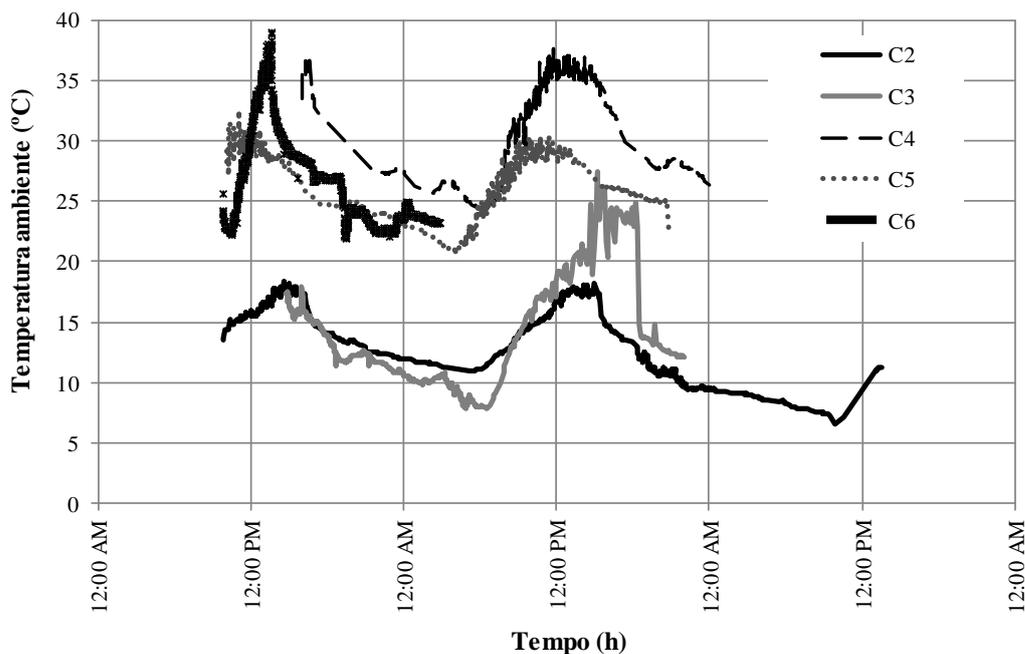


Figura 5.12 – Registro da temperatura ambiente nos concretagens

É bom salientar que as primeiras concretagens C2 e C3 foram feitas nos meses mais frios enquanto que as restantes foram realizadas em climas mais cálidos.

Levando em conta a influência da resistência do concreto e da temperatura ambiente no desenvolvimento da maturidade do concreto e também da resistência à compressão e a aderência, foram propostos valores mínimos de maturidade (Figura 5.13) em base desta experiência de 6 concretagens e os valores de maturidade obtidos antes de fazer os ensaios CAPULOT aos 3 dias.

Propõem-se estes valores orientativos para a tomada da decisão do momento ótimo para executar os ensaios de CAPULOT no canteiro de obra.

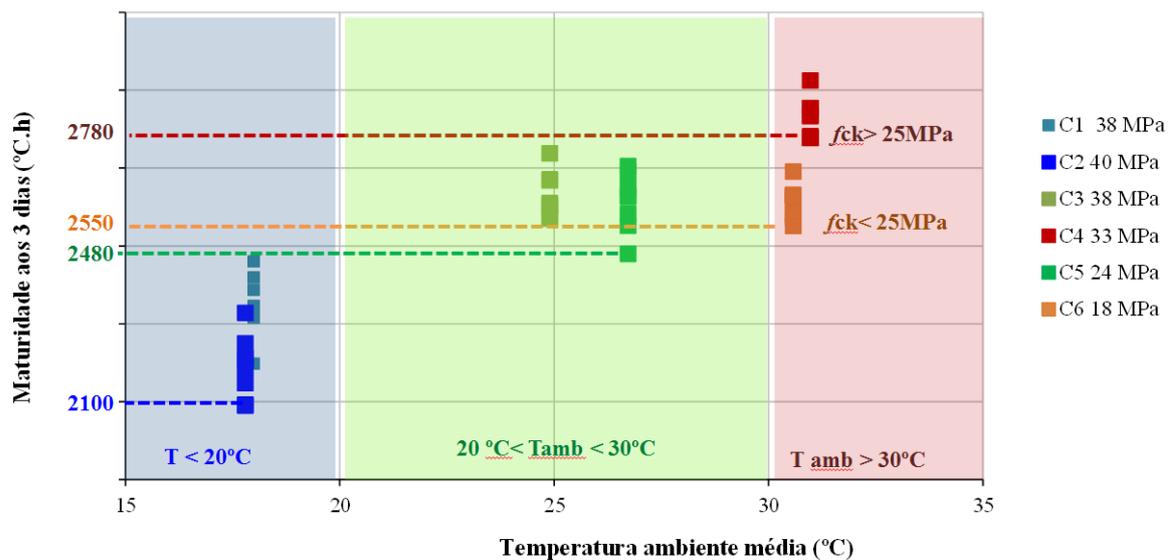


Figura 5.13 – Valores mínimos de maturidade para execução dos ensaios CAPULOT segundo a classe do concreto e a temperatura ambiente.

Os resultados obtidos nesta etapa nos corpos de prova, testemunhos, CAPULOT e SBPULOT são válidos para as condições de cura descritas no item 4.3.3.

6. IMPLEMENTAÇÃO DE ENSAIOS EM CANTEIROS DE OBRA

O objetivo desta etapa, foi levar para o canteiro de obras o novo ensaio, nessa direção foram escolhidas diversas tipologias de obras, onde seria útil conhecer nas primeiras idades a resistência do concreto. As obras escolhidas foram estruturas para edifícios comerciais, corporativos, pavimentos nas ruas, viadutos e elementos de reforço estrutural. Os objetivos secundários para a implementação dos ensaios são citados abaixo :

- Avaliar a resistência do concreto para retirada dos encofrados nas primeiras idades.
- Otimizar elementos no re-escoramento da estrutura em relação à resistência estimada nas primeiras idades.
- Liberar ao tráfego o mais rápido possível às ruas pavimentadas.
- Comprovar a resistência do concreto para fazer a protensão dos elementos estruturais.

Nas obras foram utilizados diferentes materiais para o concreto, mais nenhum dado sobre a dosagem usada foi conhecido, somente a resistência especificada. Com isso espera-se ter uma ideia da capacidade da curva de correlação em estimar a resistência de concretos com características distintas. Para isso estabeleceu-se uma quantidade mínima de execução de ensaios à compressão e arrancamento de 40% dos ensaios feitos na Etapa 2.

O ensaio foi implementado num total de 7 canteiros de obra, em alguns dos canteiros os trabalhos foram feitos mais de uma vez. As resistências especificadas dos concretos variaram entre 25 MPa e 35 MPa. Em cada concretagem, foram moldados 36 CP e 36 CAPULOT. Os CPs foram mantidos em tanques de água e os CAPULOT foram mantidos no canteiro. Os ensaios de resistência à compressão simples e os ensaios de arrancamento foram feitos aos 3, 5 e 7 dias.

É importante assinalar uma diferença entre os CAPULOT com cura no ambiente (CA) da Etapa 2 e os CAPULOT moldados nas obras. Na Etapa 2 os CAPULOT foram mantidos no ambiente do laboratório o qual se achava próximo ao local da concretagem, entanto nos canteiros de obra essa condição não foi possível, os CAPULOT foram mantidos no canteiro de obra (perto pátio de concretagem ou num canto remoto) frequentemente na intempérie até o momento do ensaio. Para evitar fazer diferenças com as condições da Etapa 2 os moldes

foram cobertos com uma camada de areia úmida após do endurecimento superficial do concreto.

Também foram medidos os índices de maturidade nos elementos estruturais ou em blocos que foram mantidos no canteiro para comprovar os valores mínimos de maturidade para fazer o ensaio de CAPULOT. O controle de maturidade foi realizado no canteiro de obra nas horas prévias aos ensaios de CAPULOT ao terceiro dia. Isto foi feito para evitar a execução do CAPULOT no concreto que ainda não atinja os limites de maturidade estabelecidos na Etapa 2 que asseguram o desenvolvimento da aderência aço-concreto.

6.1. CANTEIRO DE OBRA 1

Prédio de 5 pavimentos para futuro edifício corporativo. Foram constuidas lajes e vigas em concreto de 30 MPa, protendido com cordoalhas engraxadas.

Conhecer se a resistência nas primeiras idades permite fazer a protensão e por tanto reduzir o tempo necessário para retirar fôrma e diminuir o cimbramento na laje, fazendo o reescoramento que permite atingir a velocidade maior na obra, era o objetivo a ser alcançado nesta obra.



Figura 6.1 – Vista geral do prédio em construção



Figura 6.2 – Detalhes das vigas com cordoalhas



Figura 6.3 – Vista geral das diferenças no escoramento e cimbramento.

A moldagem do concreto e a conservação dos corpos de prova e CAPULOT foram feitas dentro do prédio em construção, até alcançar a data de execução dos diversos ensaios.



Figura 6.4 – Moldes preparados para moldagem



Figura 6.5 – Sensor para medição da maturidade



Figura 6.6 – Proteção dos CAPULOTs no prédio

Os ensaios do CAPULOT foram feitos no canteiro, como e mostrado nas imagens.



Figura 6.7 – Preparação para ensaio CAPULOT, bomba hidráulica conectada na rede elétrica da obra



Figura 6.8 – Controle da maturidade do concreto



Figura 6.9 – Execução do ensaio CAPULOT

Nesta obra os trabalhos foram feitos duas vezes.

6.2. CANTEIRO DE OBRA 2

Este caso é uma pavimentação urbana em concreto simples de 25 MPa. Trata-se de uma avenida muito importante da cidade de Assunção, já que une vários setores comerciais e tem muito tráfego diário. Conhecer a resistência nas primeiras idades permitiria uma pronta liberação ao tráfego e evitar maior desconforto no trânsito.



Figura 6.10 – Vista geral da avenida



Figura 6.11 – Colocação e adensamento do concreto



Figura 6.12 – Moldagem dos CAPULOT

Neste caso, os sensores de maturidade foram colocados em dois pontos da pavimentação.



Figura 6.13 – Processo de colocação de sensores de medição da maturidade do concreto



Figura 6.14 – Cabos dos sensores de maturidade

O processo de controle da resistência pelo CAPULOT foi feito duas vezes, pelo vandalismo, que quebrou o cabo para medição da maturidade.



Figura 6.15 – Cabo quebrado pelo vandalismo

Depois disso, a maturidade foi medida colocando o concreto num balde plástico que ficou num prédio próximo da pavimentação, na intempérie.

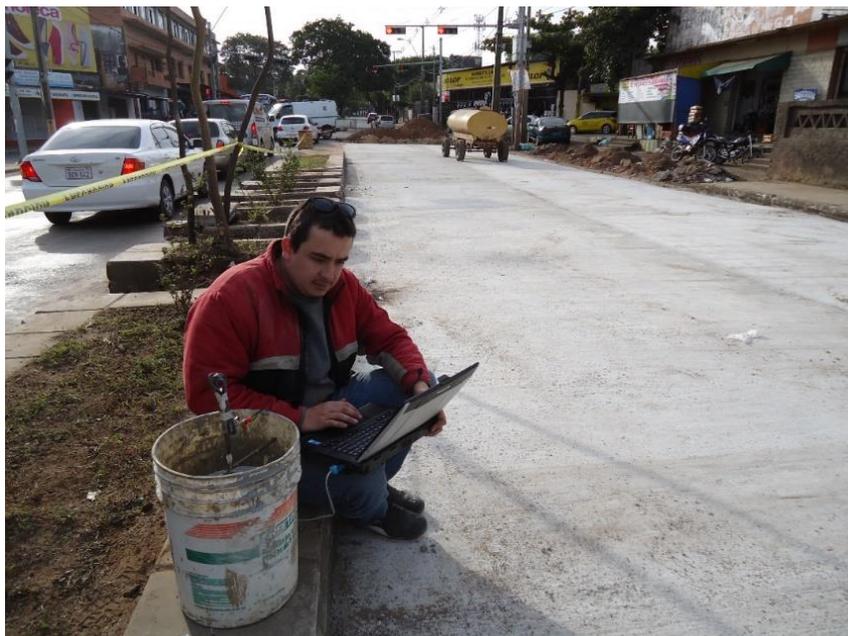


Figura 6.16 – Medição da maturidade do concreto

6.3. CANTEIRO DE OBRA 3

Esta obra trata-se de um viaduto com vigas pré-moldadas com cordoalhas engraxadas. A resistência especificada foi 35 MPa. Conhecer qual era a resistência do concreto nas primeiras idades permitiria movimentar as vigas e colocá-las na sua posição no viaduto quando atingisse resistência mínima e, dessa maneira, diminuir o prazo de execução.



Figura 6.17 – Vista geral do viaduto



Figura 6.18 – Moldagem dos CAPULOT e CPs

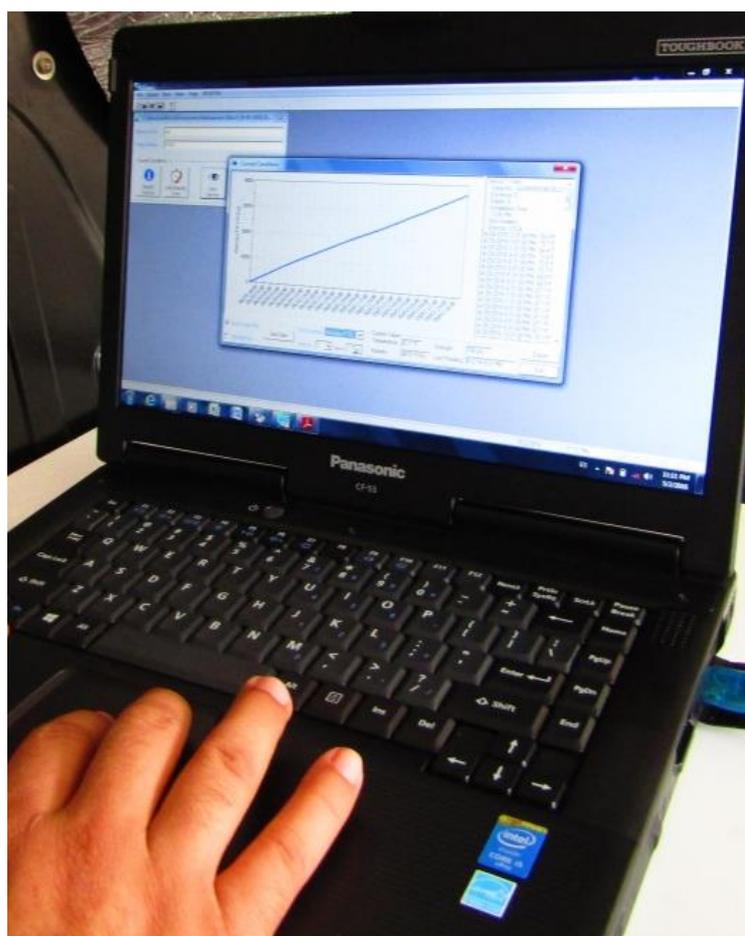


Figura 6.19 – Controle da maturidade do concreto

6.4. CANTEIRO DE OBRA 4

Trata-se de uma estrutura em concreto armado para um edifício comercial. A resistência especificada do concreto foi de 25 MPa. Conhecer a resistência nas primeiras idades permitiria o retiro do escoramento e dessa maneira dar início aos trabalhos no peso abaixo da laje, mais cedo que o previsto.



Figura 6.20 – Vista geral do canteiro



Figura 6.21 – Concretagem da estrutura



Figura 6.22 – CAPULOTs e CPs moldados

6.5. CANTEIRO DE OBRA 5

Nesta obra, um edifício comercial com 13 andares, foram feitas lajes e vigas em concreto protendido com cordoalhas engraxadas. A resistência especificada do concreto foi de 25 MPa.

Conhecer a resistência nas primeiras idades permitiria fazer a protensão e por tanto reduzir o tempo necessário para o retiro das fôrmas e diminuir o cimbramento na laje, fazendo o reescoramento, o que permitiria impor uma maior velocidade na execução da obra.

Nesta obra foram feitos dois controles da resistência do concreto, a primeira concretagem foi feita de dia e a segunda durante a noite.



Figura 6.23 – Vista geral do prédio em construção



Figura 6.24 – Detalhes das cordoalhas na laje

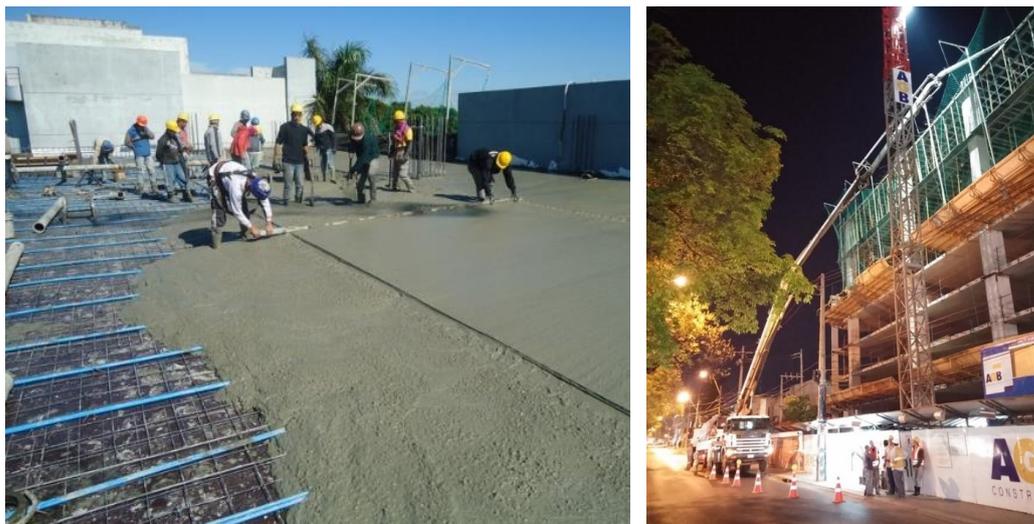


Figura 6.25 – Concretagem da estrutura no dia e na noite



Figura 6.26 – Vista geral do escoramento



Figura 6.27 – Vista geral das diferenças no escoramento nos diferentes pavimentos

A moldagem do concreto e a conservação dos CPs e CAPULOTs foram feitas dentro do prédio em construção até alcançar a data de execução dos diversos ensaios.



Figura 6.28 – Vista geral dos CAPULOT, CPs e medidores da maturidade do concreto

6.6. CANTEIRO DE OBRA 6

Nesta obra foram feitas vigas de reforço em concreto protendido com cordoalhas engraxadas. A resistência especificada do concreto foi de 30 MPa.

Conhecer a resistência nas primeiras idades permitiu fazer a protensão e por tanto reduziu o tempo necessário para concluir os trabalhos de reforço estrutural.



Figura 6.29 – Vista geral das vigas de reforço



Figura 6.30 – Detalhe das vigas com cordoalhas e sensor de maturidade



Figura 6.31 – Moldagem dos CAPULOT



Figura 6.32 – Armazenamento dos CAPULOT

6.7. CANTEIRO DE OBRA 7

Nesta obra foi feita uma estrutura em concreto armado para um edifício corporativo de 3 andares. A resistência especificada do concreto foi de 35 MPa.

Conhecer a resistência nas primeiras idades permitiria estabelecer um esquema ótimo de re-escoramento e agilizar o processo da construção e reduzir os custos de aluguel dos escoramentos.



Figura 6.33 – Vista geral da estrutura em construção



Figura 6.34 – Vista do cimbramento e escoramento



Figura 6.35 – Localização do sensor e medição da maturidade no primeiro dia



Figura 6.36 – Colocação e adensamento do concreto



Figura 6.37 – Moldagem dos CAPULOT e CPs

Finalmente foram moldados e ensaiados um total de 240 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 e 240 CAPULOT, sendo esta quantidade equivalente á 45% dos testes executados na Etapa 2 do trabalho, cumprindo o limite mínimo de ensaios estabelecido no início.

6.8. RESULTADOS DE ENSAIOS EM CANTEIROS DE OBRA

6.8.1. Controle de maturidade

A temperatura ambiente variou entre 12°C e 22°C. O controle de maturidade nos canteiros de obras foi realizado conforme ao critério proposto no item 5.3.2.8. Na Figura 6.34 pode-se verificar que os índices mínimos propostos (Figura 5.12) foram atingidos em todas as concretagens com exceção do Canteiro 4 que apresentou um índice de 2019°C·h ao terceiro dia, por isso os ensaios de CAPULOT foram feitos somente aos 7 dias.

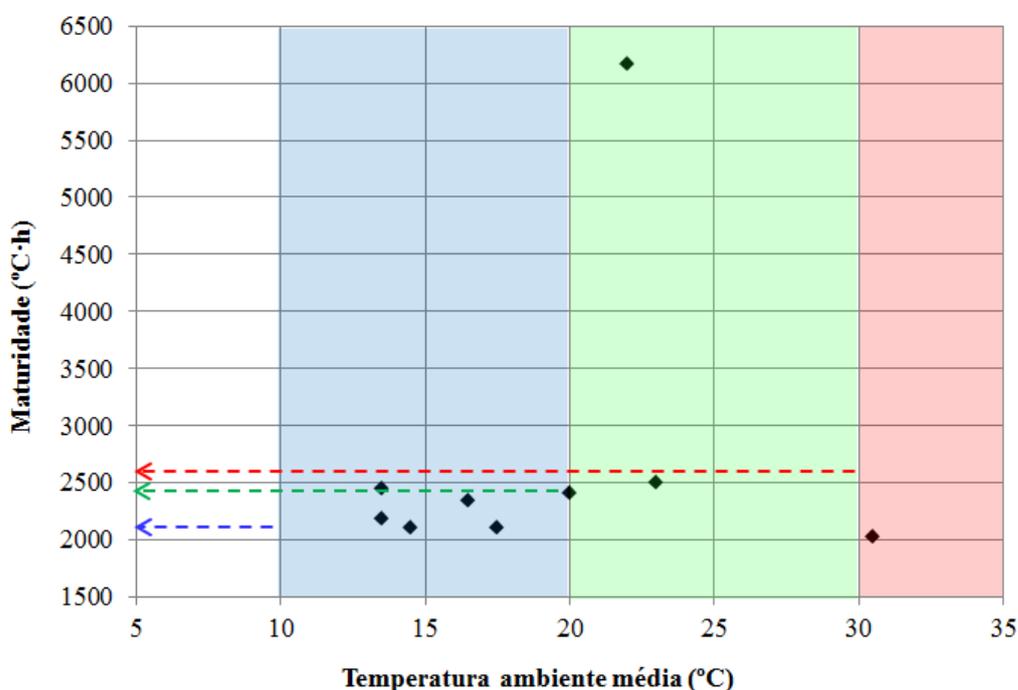


Figura 6.38 – Maturidade aos 3 dias nos canteiros de obra.

6.8.2. Resultados da estimacão

Os valores individuais obtidos dos ensaios CAPULOT para cada idade foram processados da mesma forma descrita na Etapa 2. Foi obtido um valor de resistência máxima de aderência para cada idade. Foi utilizada a relao CAPULOT-CPs obtida na Etapa 2 (Figura 5.6) para estimar os valores de resistência  compressão a partir dos resultados de aderência.

A Figura 6.39 apresenta os resultados de tensão máxima de aderência e resistência  compressão obtidos na experiência nos 7 canteiros de obra com a reta de correlao entre as variáveis obtida na Etapa 2 e seus limites de estimacão correspondentes a dois desvios padrão.

Pode-se comprovar que os valores obtidos nas distintas obras localizam-se dentro destes limites.

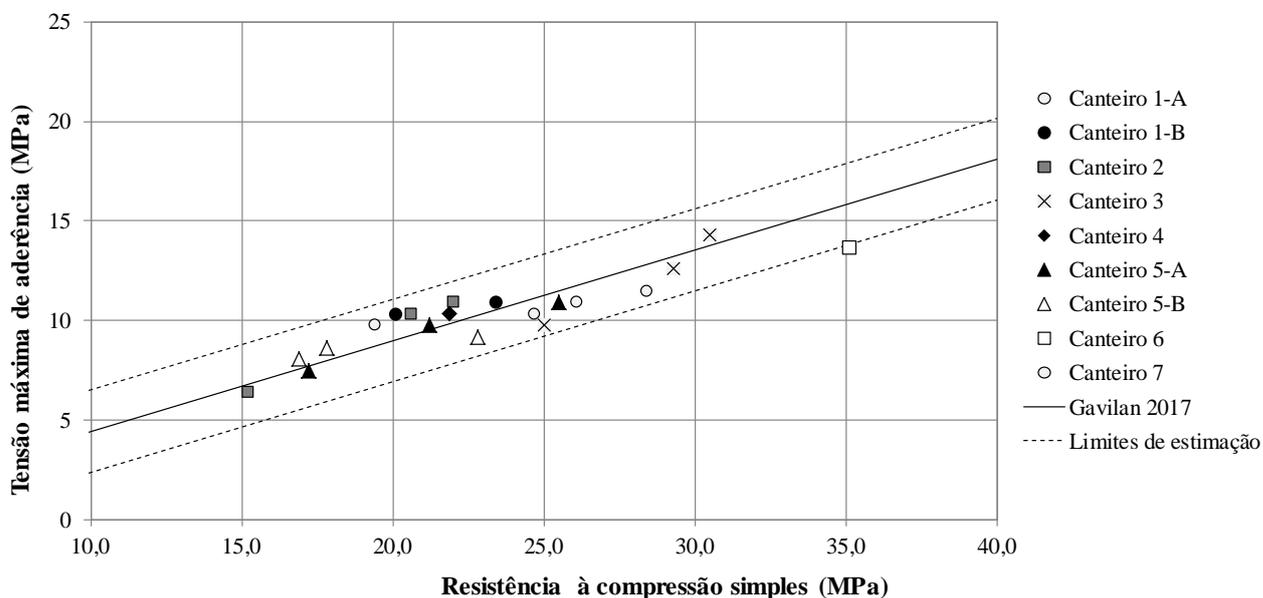


Figura 6.39 – Dados obtidos dos ensaios em canteiros

A Figura 6.40 apresenta os resultados obtidos na estimação de resistência a partir do CAPULOT contra a resistência à compressão obtida dos ensaios em CPs. Foram considerados limites de confiança de 90% para a estimação. Pode-se observar na figura que os dados apresentam uma tendência muito próxima à linha da igualdade (linha de pontos).

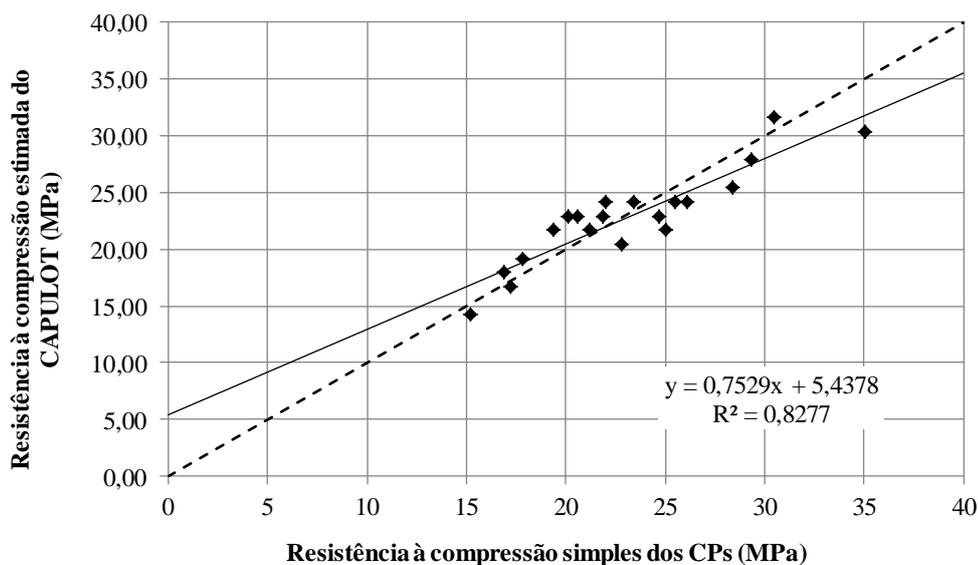


Figura 6.40 – Estimação da resistência á compressão

A Tabela 6.1 apresenta os erros relativos na estimativa de resistência, relativos às resistências dos corpos de prova.

Tabela 6.1 – Erro de estimação da resistência.

Canteiro	Resistência estimada do CAPULOT (MPa)	Resistência dos CPs (MPa)	Erro da Estimação (%)
1-A	21,68	19,4	11,8
	22,93	24,7	-7,2
	24,19	26,1	-7,3
1-B	22,93	20,1	14,1
	24,19	23,4	3,4
2	14,23	15,2	-6,4
	22,93	20,6	11,3
	24,19	22,0	9,9
3	21,77	25,0	-12,9
	27,90	29,3	-4,8
	31,64	30,5	3,7
4	22,89	21,9	4,5
5-A	16,71	17,2	-2,8
	21,68	21,2	2,3
	24,19	25,5	-5,2
5-B	17,96	16,9	6,3
	19,19	17,8	7,8
	20,45	22,8	-10,3
6	30,36	35,1	-13,4
7	25,42	28,4	-10,5

A Figura 6.41 mostra a distribuição em quartilhes do erro de estimação obtidos a partir dos resultados nos canteiros. A média atinge o valor 7,8% o qual é coincidente com o resultado de Silva (2014).

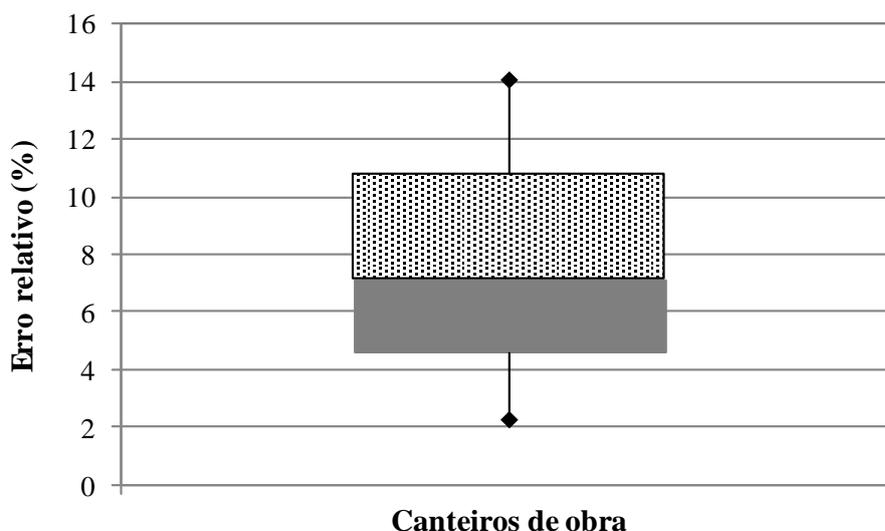


Figura 6.41 – Distribuição do erro relativo de estimação da resistência

6.8.3. Conclusões sobre a logística na implementação do CAPULOT em canteiros de obra

Como pode-se ver os ensaios são de implementação muito simples. A base para CAPULOT, o equipamento hidráulico, um computador e o leitor de maturidade foram instalados num furgão que pode-se transladar facilmente para os canteiros de obra.

Os principais problemas encontrados na implementação do ensaio CAPULOT nos canteiros de obra, foram:

- A dificuldade de conexão elétrica da bomba hidráulica no tabuleiro elétrico das obras;
- A dificuldade de isolar os moldes CAPULOT (que devem permanecer sem movimentação nos primeiros três dias) devido ao com o ritmo acelerado das obras e, o pessoal despreparado que, em algumas ocasiões movimentaram os moldes CAPULOTs;
- A extrema sensibilidade da barra de aço ao transportar os CAPULOT para o laboratório. Em concretos da classe C20, os valores dos ensaios foram extremamente baixos;
- O vandalismo, no caso da pavimentação de ruas. O cabo para fazer a medição da maturidade deve ser protegido da atuação de vândalos quando ficarem na rua que está sendo pavimentada.



Figura 6.42 – Traslados dos CAPULOTs e CPs para fazer ensaios no laboratório.

7 CONCLUSÕES

Atendendo a proposta do novo ensaio CAPULOT baseado no princípio do APULOT, podem-se estabelecer as seguintes conclusões principais:

DIMENSÕES GEOMÉTRICAS DA FORMA PARA O ENSAIO

Determinou-se nos ensaios do pull-out, que o resultado das formas do tipo cúbica tem menor variação que as formas cilíndricas, sendo que, as arestas de 10 e 20 cm apresentaram menor coeficiente de variação.

Adaptou-se o molde cúbico CAPULOT com uma aresta de 10 cm e barra de aço de 8mm, devido ao fato de ser a aresta de menor dimensão que cumpre com a relação mínima diâmetro/cobrimento, para evitar o fendilhamento no ensaio.

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Enquanto o ensaio determina a resistência “in loco” do concreto, para uma faixa de resistência de C20 a C40 de acordo a classificação da NBR12655 é imprescindível monitorar a maturidade do concreto. Determinou-se um valor de maturidade $2100^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ quando a temperatura ambiente é menor a 20°C , $2500^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ para temperatura ambiente em uma faixa de 20 a 30°C e $2800^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ para temperatura ambiente maior aos 30°C . Os valores determinam o momento certo para fazer o ensaio do CAPULOT.

INFLUÊNCIA DA CURA DAS FORMAS

Dentro da faixa da resistência estudada, os resultados obtidos dos ensaios CAPULOT e SBPULOT mostram que a cura não tem influência na tensão de aderência nem às primeiras idades nem aos 28 dias nas condições das avaliações realizadas nesta tese. Quanto a isso concluí-se que não é preciso conservar as formas CAPULOT em recipientes para a cura no canteiro de obra, sendo suficiente fazer uma cobertura com areia úmida e pôr em algum lugar com proteção contra choques acidentais e movimentação prematura.

CORRELAÇÃO ADERÊNCIA-RESISTÊNCIA

Verificou-se a correlação entre a resistência à compressão do concreto e a tensão de aderência máxima entre o concreto e o aço para as primeiras idades (3 a 7 dias), bem como aos 28 dias. O coeficiente de correlação é de 0,89 e indica uma forte correlação das variáveis de acordo com a interpretação de Shimakura (2002).

Assim, foi estabelecida uma linha de regressão para calcular o valor da resistência de compressão a partir da tensão máxima de aderência no ensaio CAPULOT.

A linha de regressão estabelecida é semelhante ao obtida por Lorrain e Barbosa (2008).

IMPLEMENTAÇÃO EM CANTEIRO DE OBRAS

A adequação do teste proposto foi verificada no controle da resistência do concreto em 7 obras, 20 medições, onde somente a resistência especificada era conhecida, mais nenhum dado sobre a dosagem usada era conhecido. A colocação do concreto nos moldes foi feita com rapidez e facilidade, como também a desmoldagem às 24 hs. O armazenamento não possui inconvenientes desde que não seja preciso fazer a cura tradicional no canteiro de obra. O equipamento de ensaio é pequeno, leve e simples, pode ser levado e instalado com facilidade no local da obra. O aspecto que requer especial atenção são os cuidados durante a moldagem, a desmoldagem e a manipulação, evitando golpes na barra de aço, devido à possibilidade de alterar o resultado final do teste.

ERRO DA ESTIMAÇÃO

Os resultados obtidos em obras onde se aplicou o método proposto indica um erro médio da ordem de $\pm 8\%$, em relação ao valor determinado por meio de rotura de cilindros, com cura em condições normalizadas.

VALOR DA PESQUISA

A aplicação do ensaio CAPULOT e a complementação de sensores de maturidade colocados no concreto da obra, mostra sua utilidade nos casos que não se disponham de informação sobre a dosagem. Com a definição da classe de resistência, o valor de maturidade e as condições ambientais é possível determinar o momento ótimo para retiro das formas da estrutura ou para fazer a protensão correspondente.

Este teste converte-se em uma alternativa do ensaio Lock-Test, tendo a vantagem que é realizado em formas, e, portanto, não se produz nenhum dano sobre a estrutura, tendo a mesma representação que o ensaio realizado sobre a própria estrutura.

Igualmente, em comparação com o processo tradicional, a colocação de sensores de maturidade no concreto apresenta a vantagem de não requerer a correlação prévia, assim como a determinação de resistência se baseia na relação entre a aderência e a resistência a compressão do concreto, sendo a maturidade um indicador complementar para a definição do momento da realização do ensaio, conforme varia as condições ambientais.

RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como uma continuação deste estudo sugerem-se os seguintes tópicos que ainda não foram investigados:

- Estudar a influência do tipo de cimento e dos aditivos, plastificantes, super e hiperplastificantes no desenvolvimento da tensão de aderência entre o concreto e o aço durante as primeiras idades;
- Estender o estudo do concreto á resistências superiores C45, C50 e classes superiores de Grupo II;
- Verificar novas expresões de correlação de tipo polinômicas nas distintas classes de resistência;
- Estudar a influência da configuração geométrica de diferentes barras de aço de 8 mm, nos resultados dos ensaios de aderência pelo CAPULOT;
- Avaliar o efeto da reutilização das barras de aço nos ensaios de arrancamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMS, D.A. **Test of bond between concrete and steel**: Engineering experiment station. Illinois: University of Illinois. 1913. (Bulletin, 71).

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI COMMITTEE 214. **ACI 214R-14**: Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete. Farmington Hills, MI. 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI COMMITTEE 228. **ACI 228.1R-03**: Guide to Evaluation In-Place Methods to Estimate Concrete Strength. Farmington Hills, MI. 2003.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI COMMITTEE 306. **ACI 306R-16**: Guide to Cold Weather Concreting. Farmington Hills, MI. 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI COMMITTEE 308. **ACI 308R-16**: Guide to External Curing of Concrete. Farmington Hills, MI. 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI COMMITTEE 318. **ACI 318S-14**: Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario. España. 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI COMMITTEE 408. **ACI 408R-03**: Bond and development of straight reinforcing bars in tension. Farmington Hills, MI. 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A615M**: Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement. West Conshohocken, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A944**: Standard Test Method for Comparing Bond Strength of Steel Reinforcing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens. West Conshohocken, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C234-91a**: Standard Test Method Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel. West Conshohocken, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C31/ C31 M-12**: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. West Conshohocken, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C805-13**: Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. West Conshohocken, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C900-15**: Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete. West Conshohocken, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 684-99**: Standard Test Method for Making, Accelerated Curing, and Testing Concrete Compression Test Specimens (Withdrawn 2012). West Conshohocken, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1074-11**: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. West Conshohocken, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1231-15**: Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Concrete Cylinders. West Conshohocken, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 178**: Standard Practice for Dealing with outlying observations. West Conshohocken, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto- Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto- Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto- Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimiento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480-2**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado: especificação. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584**: Concreto endurecido- Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro, 2012.

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, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-2**: Concreto - Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto Parte 2: Resistência à tração na flexão. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido- Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15146**: Controle tecnológico de concreto – Qualificação de pessoal – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33**: Concreto-Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

BARBOSA, M.P.; PEREIRA, J.B.; LORRAIN, M.. **Análise experimental da influencia e avaliação da influência da resistência à compressão do concreto no ensaio de aderência APULOT**. In: 55° Congresso Brasileiro do Concreto, 2013, Gramado/RS. Anais do 55° CBC. São Paulo/SP: IBRACON, 2013.

BARBOSA, M.P.G.; SANCHEZ FLIHO, E.S.; OLIVEIRA, T. M.; SANTOS, W. J. **Analysis of the relative rib area of reinforcing bars pull out test**. Materials Reserch, v.11, p. 453-457, 2008.

BENTZ, D. P. **A review of early properties of cement-based materials**. Cement and Concrete Research.National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA. 2007.

BENTZ, D.P.; PELZ, M.; WINPIGLER, J. **Early-Age Properties of Cement-Based, materials. II: Influence of Water-to-Cement Ratio**. Journal of Materials in Civil Engineering. ASCE, September, 2009.

BREYSSE, D. **Nondestructive evaluation of concrete strength**: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. Construction and Building Materials. N° 33, pg. 139-163. 2012.

BULLARD, J.; JENNINGS, H.; LIVINGSTON, R.; NONAT, A.; SCHERER, G.; SCHWEITZER, J.; SCRIVENER, K.; THOMAS, J.. **Mechanisms of cement hydration**. Cement and Concrete Research. Research 41, pg. 1209-1221. 2011.

BUNGEY, J. H.; LONG, A.E.; SOUTSOS, M.N.; HENDERSON, G.D. **Early Age Properties strength assesement of concrete on site**. Best Practice Guides For In-Situ Concrete Frame Buildings. BRE Report 387. 2000.

BUNGEY, J. H.; MILLARD, S. G.; GRANTHAM, M.G. **Testing of concrete in structures**. 4ª ed. New York: Taylor e Francis. 2006. 339p.

BUNGEY, J. H.; SOUTSOS, M. N.; LONG, A. E. **Pullout Test Correlations and In-Place Strength Assessment – The European Concrete Frame Building Project**. ACI Materials Journal. Title nº 102-M48. p. 422-428, 2005.

CALAVERA, J.; FERNÁNDEZ G, J.; GERMÁN G., ISABEL; LEY U, J. **Estudio experimental sobre la influencia de distintos procedimientos de curado inicial en obra, en la resistencia a compresión de corpos de prova de hormigón**. Notas de Información técnica (NIT 1-05) INTEMAC. 2005. 29p.

CALAVERA RUIZ, J. **Cálculos y conceptos en la historia del hormigón**. Académico de Ciencias e Ingeniería de Lanzarote, Discursos Académicos 5, 31p.. Madrid, 2003.

CALDERARO, R.P.; BARBOSA, M.P.. **Aderência Aço-Concreto: Análise experimental da influencia da variação da geometria da garrafa PET e do cobrimento do concreto ao redor da barra de aço**. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, 2012, Maceió/AL. Anais do 54º CBC. São Paulo/SP: IBRACON, 2012.

CANDIA DOMINGUEZ, A; CADANOVAS LARÁN, S.. **Evaluación de la influencia del diametro de la varilla de acero en la determinación de la resistencia del Hº a través de la aplicación del ensayo APULOT**. Trabajo Final de Grado - Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción. 2015.

CÁNOVAS, M. F. **HORMIGÓN**, Adaptado a la Instrucción de Recepción de Cementos RC-08 y a la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. Garceta, 10ª Ed, 672 p., 2013.

CARROMEU, C. C.; CALVANCANTE DE OLIVEIRA, K.; HELENE, P.; HERVÉ NETO, EGYDIO; BILESKY, P.; PACHECO, J.. **A importância da acreditação laboratorial e da certificação de mão de obra no controle de aceitação do concreto**. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, 2012, Maceló-Alagoas, IBRACON, 19 p.

CODIGO DE DEFENSA DEL CONSUMIDOR. **Lei Nº 8078**. 1990. Presidência da República, Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos.

CONCRETE REINFORCING STEEL INSTITUTE. **Evaluation of reinforcing bars in old reinforced concrete structures**. Engineering data report number 48. Illinois, 4p, 2001.

COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. **EHE-08**: Instrucción del Hormigón Estructural. Madrid, p. 704, 2008.

COMISION IV, Grupo Español del Hormigón (G.E.H.O.). **Durabilidad de Estructuras de Hormigón**. Guía de Diseño CEB, Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Madrid. 1991.

COMITÉ INTERNATIONAL DU BETON. **RILEM/CEB/FIP RC6**: Bond test for reinforcing steel: pull-out test. CEB, Paris, Francia. 1983.

ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. **CSN-EN 10080**: Steel for the reinforcement of concrete - Weldable reinforcing steel - General. Český Normalizační Institute. Praha, 2005.

ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. **CSN-EN 12390-2**: Testing hardened concrete. Making and curing specimens for strength tests. Český Normalizační Institute. Praha, 2009.

DAL BOSCO, V.I.; VALE SILVA, B; TROIAN, P.; BARBOSA, M.P.; SILVA FILHO, L.C.P.. **Comparativo experimental entre los métodos de ensaios pull-out e push-in para determinação da tensão de aderência aço-concreto**. In: 54° Congresso Brasileiro do Concreto, 2012, Maceió/AL. Anais do 54° CBC. São Paulo/SP: IBRACON, 2012.

DAHLGREN, A.; SVENSSON, L. **Guidelines and Rules for Detailing of Reinforcement in Concrete Structures**. Chalmers University of technology, Master's thesis. Göteborg, Sweden. 295p. 2013.

DE MOURA, J.R.. **Recomendações para sistemas estruturais em edificações com a utilização de protensão com cordoalhas engraxadas**. Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Universidade de Brasília, DF, Brasil, 20 p., 2002.

ENGSTRÖM, B.; MAGNUSSON, J.; HUANG, Z.. **Pull-Out bond behavior of ribbed bars in normal and high-strength concrete with various confinements**. SP 180-10, p. 215-242. 2011.

DE ALMEIDA, A. **Belgo Bekaert Arames investe R\$ 24 milhões para produtos destinados à construção civil**. Portal Fator Brasil. 2014.

EUROPEAN COMMITTEE STANDARDIZATION. **EN 10080**: Steel for the reinforcement of concrete - Weldable reinforcing Steel - General. 2005.

EUROPEAN COMMITTEE STANDARDIZATION. **EN 12390-2**: Testing hardened concrete – Part 2: making and curing specimens for strength test. 2009.

FIB: FÉDÉRATION INTERNACIONALE DE BÉTON. **Model Code 2010**. Draft Model Code. Lausanne: fib, bulletin 55, v. 1. March 2010.

FERNÁNDEZ G., J. ; G. GONZALEZ, I; HOSTALET A.; F.; IZQUIERDO, J. M^a, B.; LEY U.; J.. **Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón. Ensayos no destructivos y pruebas de carga**. INTEMAC, España, 245 p., 2001.

FERREIRA, E.G.; GONÇALVES, R.S.; CARVALHO, E.; CUNHA, J.C.; BARBOSA, M. P.; LORREIN, M.S.. **Controle da Qualidade do Concreto Pelo Ensaio de Aderência “Pull-out Test”**. In: 53° Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, FLORIANÓPOLIS/SC. Anais do 53° CBC. São Paulo/SP: IBRACON, 2011.

FRUTOS, A; LOVERA, H. **Evaluación de la Tensión de Adherencia entre el Hormigón y el Acero ante la Variación de la Resistencia a Compresión mediante el Ensayo APULOT**. Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Asunción. Paraguay. (2013)

FUSCO, P. B. **Principios Básicos para proyecto de estructura de concreto**. In: ISAI G.C., *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1ª Edição. São Paulo: Editora IBRACON, 2011. Vol. 1, cap 3, p. 101-126.

FUSCO, P. B.. **Tecnologia do Concreto Estrutural: tópicos aplicados**. 2ª ed. São Paulo: Pini, 199p. 2012.

FUSCO, P. B. **Técnica de Armar as Estruturas de Concreto**. 2ª ed. São Paulo: Pini, 395p. 2013.

GARCÍA-TAENGUA E.; MARTÍ-VARGAS J.R.; SERNA-ROS P.. **Bond of reinforcement in concrete applied to concrete quality control: the bottle bond test**. *Strain*, v. 50, p. 57-67, 2014.

GASPERATO, K.; BARBOSA, M.P.; LORRAIN, M. **Aplicação e avaliação do ensaio de APULOT em canteiros de obras de pequeno e médio porte**. In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto, 2013, Gramado/RS. Anais do 55º CBC. São Paulo/SP: IBRACON, 2013.

GAVILÁN, S. **Los riesgos en la determinación de la resistencia del hormigón a partir del uso aislado del esclerómetro. Casos de estudios**. 2º Congreso Uruguayo y 1er Congreso Regional de Gestión de la Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción. Julio, 2006.

GAVILÁN, S. **Determinación de la Resistencia del Hormigón por medio de Ensayos no Destructivos**. Tesis (Maestría) – Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”, Facultad de Ciencias y Tecnología. Asunción, Paraguay. 2011.

GAVILÁN, S.; DO SILVA VALE, B.; PINTO DA SILVA, L.C.; PINTO BARBOSA, M.. **Ensayo de arrancamiento, relación recubrimiento-diámetro de barras para evitar el efecto splitting**. XXXVI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Uruguay. 2014.

GERMANN PETERSEN, C. **LOK-TEST and CAPO-TEST pullout testing, twenty years experience**. Non-Destructive Testing in Civil Engineering Conference. Liverpool, U.K. 19 pg. 1997.

GODOY, J.L.; JACINTHO, A.E.P.G.A.; PIMENTEL, L.L.; LORRAIN, M.; BARBOSA, M.P. **Substituição de uma parcela do agregado natural por borracha de pneus: influência na aderência aço e concreto**. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, 2012, Maceió/AL. Anais do 54º CBC. São Paulo/ SP: IBRACON, 2012.

GUISANDE GONZÁLEZ, C.; VAAMONDE LISTE, A.; BARREIRO FELPETO, A.. **Tratamiento de datos con R, STATISTICA y SPSS**. Editorial Diaz de Santos. Madrid, España. 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **BS ISO 5725-1:** Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions. 1994.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **BS ISO 5497-1:** Precision of test methods. Guide for the determination of repeatability and reproducibility for a standard test method by inter-laboratory tests. 1993.

JERÔNIMO, V.; DE ARAUJO SOUZA, L.A.; DO VALE SILVA, B; GRANATA MARQUEZ, G.; PINTO DA SILVA FILHO, L.C. **Análise da influencia da regulação dos topos de corpos de prova cilíndricos sobre a resistência à compressão do concreto.** In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis - SC, IBRACON, 16 p.

KONDRAIVENDHAN, B.; BHATTACHARJEE, B.. **Effect of Age and Water-Cement Ratio on Size and Dispersion of Pores in Ordinary Portland Cement Paste.** ACI Materials Journal, title no. 107-M19, p. 147 - 154, 2010.

KOVLER, K.; ROUSSEL, N. **Properties of fresh and hardened concrete.** Cement and Concrete Research. p. 776 - 785, 2011.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Estructuras de Hormigón Armado.** 2ª ed. El Ateneo. Buenos Aires, 1993. 297 p.

LIAN, C.; ZHUGE, Y.; BEECHAM, S. **The relationship between porosity and strength for porous concrete.** Construction and Building Materials. p. 4294-4298. 2011.

JERÔNIMO, V.; DE ARAUJO SOUZA, L.A.; DO VALE SILVA, B; GRANATA MARQUEZ, G.; PINTO DA SILVA FILHO, L.C. **Análise da influencia da regulação dos topos de corpos de prova cilíndricos sobre a resistência à compressão do concreto.** In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis - SC, IBRACON, 16 p.

LORRAIN, M; BARBOSA, P.M..**Controle de qualidade dos concretos estruturais: ensaio de aderência aço-concreto.** Revista Concreto & Construções, São Paulo, v. 36, n. 51, p. 52-57, 2008.

LORRAIN, M; BARBOSA, P.M.; SILVA FILHO, L.C.P. **Estimation of compressive strength based on Pull-out bond test results for on-site concrete quality control.** IBRACON, Structures and Materials Journal, v. 4, p. 4, 2011.

LORRAIN, M; CAETANO, L.F.; VALE SILVA, B.; GOMES, L.E.S; BARBOSA, M. P.; SILVA FILHO, L.C.P. **Bond strength and rib geometry: a comparative study of the influence of deformation patterns on anchorage bond strength.** In: PCI Annual Convention & 3rd International FIB Congress, Washington, D.C. Chicago: 3rd FIB International Congress FIB, 2010.

MA, H.; LI, Z. **Realistic pore structure of Portland cement paste: experimental study and numerical simulation.** Computers and Concrete, Vol. 11, No 4, p. 317 – 336, 2012.

MAKNI, M.; DAOUD, A.; LORRAIN, M. **Towards a standard pull-out test specimen: geometrical specifications**. 3rd fib International Congress. Washington D.C., FIB, 2010.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**. 2° Ed, 392pg. CRC Press, 2004.

MEDEIROS-JUNIOR, R.A.; LIMA, M. G.; MEDEIROS M.H.F.; REAL, L.V.. **Investigação da resistência à compressão**. Vol. 4, N°2, p. 116-132. Mayo-Agosto. 2015.

MENZEL, CARL. **Some Factors Influencing Results of Pull-Out Bond Test**. *Journal of American Concrete Institute*. Vol. 35, p. 517-542. Michigan. 1939.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto, Estructura, Propiedades e materiais**. Editora: Nicole Pagan Hasparyk; 782 p., 2ª Edición. 2014.

NAVIDI, WILLIAM. **Estadística para ingenieros y científicos**. Editorial Mc Graw-Hill México, D.F., 2006.

NEVILLE A.M.; BROOKS J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª ed. Tradução: CREMONINI R. A.. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

NGUYEN, N.H.; ROTTA, J.R.S.; BARBOSA, M.P.; PRINCE-AGBODJAN, W.; LORRAIN, M.S.. **Ensaio “APULOT”: Avaliação do comportamento da interface aço-concreto usando ensaios**. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto, 2011, Florianópolis/SC. Anais do 53º CBC. São Paulo/SP: IBRACON, 2011.

NORMA ESPAÑOLA. **UNE-EN 206-1**: Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad. AENOR. Madrid, 2008.

NORMA ESPAÑOLA. **UNE-EN 12390-2**: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de cuerpos de prueba para ensayos de resistencia. AENOR. Madrid, 2001.

NORMA ESPAÑOLA. **UNE-EN 12390-8**: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de Penetración de agua bajo presión. AENOR. Madrid, 2001.

NORMA ESPAÑOLA. **UNE-EN 12504-3**: Ensayos de hormigón en estructuras. Determinación de la fuerza de arrancamiento. AENOR. Madrid, 2006.

ORTEGA BARRIONUEVO, F. **Influencia de la compactación y conservación de cuerpos de prueba durante su permanencia en obra, así como su posterior refrentado en la resistencia a compresión del hormigón (periodo 1997-2007)**. Tesis Doctoral - Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería de la Construcción. Madrid, 2010.

PERES, L.D.P. **Avaliação de propriedades mecânicas de peças pré-moldadas submetidas à cura térmica pelo método da maturidade.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. 163 p. 2006.

PROVIDAKIS, E. L. **T-WiEYE: An early-age concrete strength development monitoring and miniturized wireless impedance sensing system.** Greece: Technical University of Crete. Procedia Engineering, ICM 11, 484 - 489, 2011.

Recomendações para Elaboração de Projetos Estruturais de Edifícios de Concreto. 2014. Disponível em: <http://site.abece.com.br/index.php/pubrecomendacoesprojetos>

SANTIAGO, W.C. **Estudo da (não-) conformidade de concretos produzidos no Brasil e sua influência na confiabilidade estrutural.** 107 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SCHABOWICS, K.; HOLA, J. **State-of-the-art non-destructive methods for testing of building structures – anticipated development trends.** Archives of Civil and mechanical engineering. Vol. X, N° 3, pg. 5-18. 2010.

SHIMAKURA, S.E. **Interpretação do coeficiente de correlação.** UFPR, 2002. [Disponível em: <http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/node74.html> acessado em 15 de setiembre de 2017].

SILVA FILHO, L. C. P.; VALE SILVA, B; DAL BOSCO, V.I.; GOMES, L.E.S.; BARBOSA, M.P. **Analysis of the influence of rebar geometry variations on bonding strength in the pull-out test.** In: Bond in Concrete, 2012 – Bond, Anchorage, Detailing. Bresnia, Italy, 2012.

SILVA, B. **Proposição de um teste de aderência para o controle tecnológico da resistência à compressão do concreto.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2014.

SILVA, B. **Investigação do potencial dos ensaios APULOT e pull-out para da estimativa da resistência a compressão do concreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, UNESP, 2010.

SOFI, M.; MENDIS, P. A.; BAWEJA, D. **Estimating early-age in situ development of concrete slabs.** Construction and Building Materials. University of Melbourne. p. 659-666, 2011.

STATISTICA versão 12 Copyright©StatSoft. License Number for Sergio Gavilan BX412G457512FA-N.

TAKAMI, L. **Tecnología e Materiais:** Evento em Vitória explica projeto de lajes planas tensionadas. Revista Techne, Ed. 174, 2011.

TASTANI, S. P.; PANTAZOPOULOU, S. J. **Direct Tension Pullout Bond Test: Experimental Results.** Journal of Structural Engineering. p. 731-743, 2010.

TAWIE, R.; LEE, H. K. **Monitoring the strength development in concrete by EMI sensing technique:** Construction and Building Materials, 24.p.1748, 2010.

TENNIS, P.; JENNINGS, H. **A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes.** Cement and concrete research.USA, 2000.

THOMAS, J.J.; BIERNACKI, J. J.; BULLARD, J.W.; BISHNOI, S.; DOLADO, J.S.; SCHERER, G.W.; LUUGE, A. **Modeling and simulation od cement hydration kinetics and microstructure development.** Cement and Concrete Research, Vol 41, issue 12, pag 1257-1278, 2011.

TORRE-CASANOVA, A.; JASON, L.; DAVENNE, L.; PINELLI, X. **Confinement effects on the steel-concrete bond strength and pull-out failure.** Engineering Fracture Mechanics, Vol 97, pg. 92-104, 2013.

VALE SILVA, B. **Investigação do potencial dos ensaios APULOT e pull-out para estimativa da resistência a compressão do concreto.** Tese de mestrado. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Universidade Estadual Paulista, São Paulo. Brasil. 2010.

WEI, Z.; XIAO, L.; LI, Z. **Prediction of standard compressive strength of cement by the electrical resistivity measurement:** Construction and Building Materials 31. p. 343, 2012.

YEON, J.; CHOI, S.; WON, M. **In situ measurement of coefficient of thermal expansion in hardening concrete and its effect on thermal stress development.** Construction and Building Materials, 38. p. 309. 2013.