

A RESISTÊNCIA DO CONCRETO SOB CARGA MANTIDA E A IDADE DE ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA

Paulo R. L. Helene

Resumo

A resistência do concreto na estrutura depende da idade, a partir da qual os esforços solicitantes atingem níveis elevados. Com esforços solicitantes acima de 70% dos esforços resistentes e, desde que as tensões de compressão no concreto também atinjam e permaneçam acima de 70% a 80% da resistência à compressão do concreto, deve-se levar em conta a redução da resistência à compressão do concreto, por efeito de carga mantida. Esse fenômeno, também conhecido no Brasil por efeito Rüschi, está considerado no atual método semi-probabilista de introdução da segurança no projeto estrutural, normalizado pela NBR 6118¹ de 1978, de uma maneira indireta e não explícita, através de um coeficiente "extra" de minoração da resistência à compressão do concreto, cujo valor é de 0,85 ou 0,80, segundo a natureza do esforço considerado.

HELENE, Paulo R. L.
Prof. Associado do
Departamento de
Engenharia de
Construção Civil
da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo -
EPUSP / PCC.
Caixa Postal 61.548,
SP 05424-970,
BRASIL.



Essa maneira indireta de introdução da segurança no projeto estrutural dá margem a diferentes interpretações desse coeficiente, principalmente entendendo-o como associado, ou não, à data de estimativa da resistência característica do concreto à compressão.

Este trabalho apresenta uma contribuição no entendimento da resistência efetiva do concreto na estrutura, a partir da discussão do modelo proposto pelo Model Code CEB/90², comparando-o com índices brasileiros e confiáveis de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto com a idade.

1. Introdução da segurança no projeto estrutural

Em 1978, a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT publica a NB 1 Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado, resultado de seis anos de reuniões da Comissão de Estudos, instalada em 1972. O texto é posteriormente registrado no INMETRO sob o número NBR 6118.

O método de introdução da segurança no projeto estrutural, aí recomendado, baseado em ampla investigação internacional, promovida pelo "Comité Euro-International du Béton - CEB"³, considera as resistências e as ações, como variáveis aleatórias, conforme mostrado na Fig. 1.1. Admite uma distribuição estatística dessas variáveis e fixa um só valor, chamado valor característico.

Para considerar as outras variáveis, cujas distribuições são ainda desconhecidas ou não quantificáveis, são introduzidos coeficientes parciais de ponderação. Esses coeficientes de ponderação são denominados γ_m (ou de minoração das resistências aparentes dos materiais, γ_c para o concreto e γ_s para o aço) quando relativos à qualidade dos materiais e γ_f (ou de segurança) quando relativos às ações e ao processo de cálculo.

2. A resistência de projeto

Segundo a NBR 8681⁴ Ações e Segurança, os coeficientes de minoração da resistência dos materiais, γ_m , são o

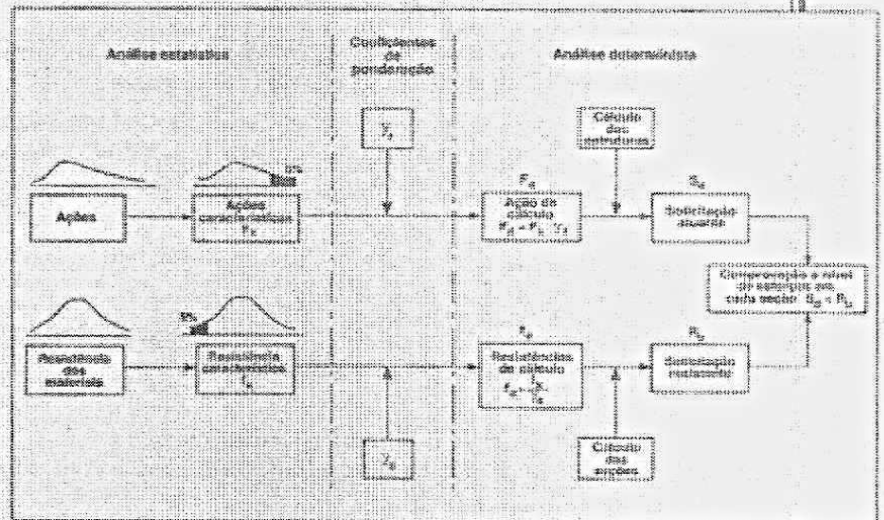


FIGURA 1.1 Esquema simplificado da sequência a seguir, no dimensionamento de estruturas, pelo método semi-probabilista recomendado pela NBR 6118⁴.

resultado do produto de outros coeficientes que representam os desconhecimentos específicos dos valores reais ou efetivos, da resistência do material na estrutura. Sendo a resistência à compressão do concreto medida:

- em um corpo de prova cilíndrico padrão (que representa o concreto da betoneira e não da estrutura);
- numa determinada idade pré-estabelecida (em geral 28 dias, enquanto a carga na estrutura atua em outras idades);
- em um ensaio instantâneo (≤ 15 minutos, enquanto na estrutura, atua por mais de 50 anos);
- com aplicação lenta da carga (tensão/tempo controlado e dentro de certa faixa);
- com carregamento contínuo (não cíclico);
- e estático (não dinâmico), é razoável esperar que a resistência à compressão efetiva do concreto na estrutura, seja diferente do valor medido nesse ensaio padrão.

A NBR 8681³ admite o γ_c (coeficiente de minoração da resistência do concreto) como resultado do produto de três coeficientes, a saber:

$$\gamma_c = \gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3} \quad \text{onde:}$$

$\gamma_{c1} = 1,3$ a $1,5$, dependendo das condições particulares de execução da estrutura⁵

$\gamma_{c2} =$ da ordem de $1,2$ —> procura compensar o fato da resistência do concreto na estrutura, apresentar uma variabilidade superior à variabilidade da resistência do concreto na "boca" da betoneira

$\gamma_{c3} =$ da ordem de $1,05$ —> procura compensar a diferença de geometria entre o corpo de prova cilíndrico padrão e aquela geometria efetiva dos componentes estruturais

$\gamma_{c4} =$ da ordem de $1,1$ —> procura compensar os desconhecimentos decorrentes das simplificações dos métodos deterministas de modelagem do comportamento da estrutura

Além do γ_c , no cálculo da resistência à compressão do concreto para fins de projeto ou dimensionamento (f_{cd}), está introduzido na NBR 6118 um segundo coeficiente de minoração k , menor que a unidade pois neste caso ele multiplica f_{ck} (na NBR 6118 o valor recomendado é de $0,85$ ou $0,80$), que procura representar:

$$k = k_1 \cdot k_2 \quad \text{onde:}$$

$k =$ coeficiente de minoração de f_{ck} para adequá-lo à envoltória do valor efetivo da resistência à compressão do concreto na estrutura, numa certa idade qualquer da sua vida útil, e, em função de uma certa história de carregamento particular da estrutura até essa data⁶

$k_1 = 1,2$ a $2,0$ —> coeficiente de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto com o tempo, em função do progressivo aumento do grau de hidratação dos compostos do cimento, contado a partir da data de

estimativa da resistência característica do concreto (data de controle), tais como: 1, 3, 7, 28, 63, 91, 182 ou outra data qualquer de estimativa da resistência característica do concreto à compressão, a partir de corpos de prova, cilíndricos padrão.

$k_2 = 0,7$ a $1,0$ —> coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto com o tempo, em função do nível de tensão aplicada a que está submetido e do período de tempo, no qual essa tensão é mantida.

A tensão de projeto, de dimensionamento ou de cálculo pode ser expressa por:

$$\sigma_{cd} = f_{ck} \cdot k / \gamma_c \rightarrow \sigma_{cd} = f_{ck} / 1,4 \cdot 0,85$$

(caso geral da NBR 6118) $\sigma_{cd} = 0,61 f_{ck}$

$$\sigma_{cd} = \frac{k_1 \cdot k_2}{\gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3}} \cdot f_{ck,t_0} = \frac{k}{\gamma_c} \cdot f_{ck,t}$$

na qual f_{ck,t_0} é a resistência característica do concreto, estimada na idade t_0 , geralmente de 28 dias. Em princípio, esse valor da tensão de cálculo, σ_{cd} , representa o valor mais provável da mínima resistência efetiva à compressão do concreto na estrutura, sob a história mais desfavorável de carregamento que ela possa vir a ser submetida, durante toda a vida útil dessa estrutura.

Para o objetivo deste trabalho considera-se γ_c como um coeficiente fixo e conhecido⁶, passando-se à discussão mais aprofundada do coeficiente k que é menos conhecido do meio técnico. Sendo k dependente do crescimento da resistência com o tempo e da redução dessa resistência, devido à manutenção e ao nível da carga atuante, passa-se a analisar esses fenômenos, separadamente.

3. Crescimento relativo da resistência à compressão do concreto com o tempo

Em extenso trabalho experimental desenvolvido por este autor⁷ como par-

te de sua tese de doutoramento, foram estudados todos os cimentos Portland brasileiros, provenientes de todas as fábricas nacionais, em traços de relação água/cimento de 0,38, 0,48, 0,58, 0,68 e 0,78, comprovando-se inequivocamente que o crescimento relativo da resistência com o tempo, depende do tipo de cimento considerado e da relação água/cimento utilizada. Quanto maior a relação água/cimento, maior o crescimento relativo final, e vice-versa. Aumento ou redução na água/cimento, significa aumento ou redução de resistência à compressão e, sendo este, um parâmetro bem mais conveniente e conhecido, apresenta-se nas Figs. 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 os gráficos típicos de evolução da resistência dos concretos amassados com os cimentos brasileiros.

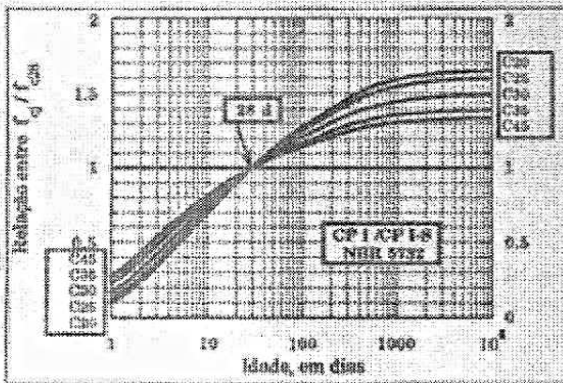


FIGURA 3.1 Crescimento relativo da resistência à compressão do concreto com a idade, tomando-se como referência f_{c28} para o CP I (NBR 5732^o).

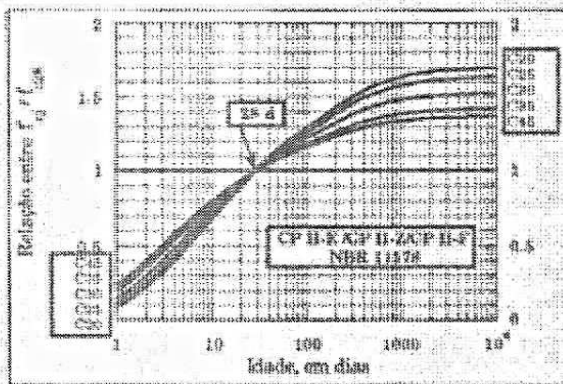


FIGURA 3.2 Crescimento relativo da resistência à compressão do concreto com a idade, tomando-se como referência f_{c28} para o CP II (NBR 11578^o).

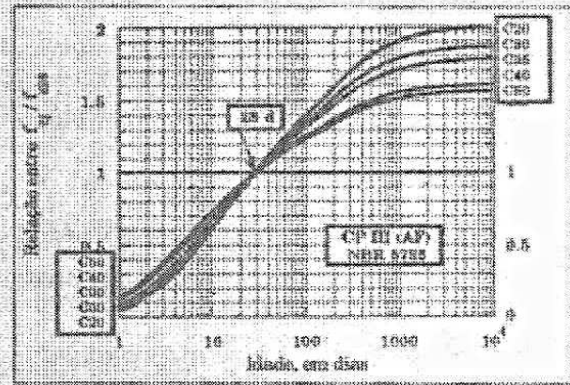


FIGURA 3.3 Crescimento relativo da resistência à compressão do concreto com a idade, tomando-se como referência f_{c28} para o CP III (NBR 5735^o).

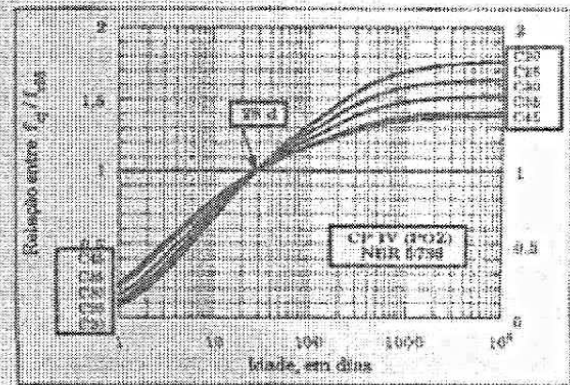


FIGURA 3.4 Crescimento relativo da resistência à compressão do concreto com a idade, tomando-se como referência f_{c28} para o CP IV (NBR 5736^o).

O Model Code CEB/FIP-90¹², apresenta a seguinte formulação simplificada e conservadora para a evolução da resistência à compressão com o tempo:

$$k_1 = f_{ct} / f_{c28} = e^{(s-1) \sqrt{28/t}} \quad \text{onde:}$$

k_1 = coeficiente de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto (neste caso, crescimento relativo referido à idade $t_s = 28$ dias)

f_{ct} = resistência à compressão na idade t , em dias

f_{c28} = resistência à compressão a 28 dias de idade

s = coeficiente que depende do tipo de cimento, podendo-se fazer a seguinte correspondência:

- $s = 0,20$ para CP V¹³ e CAR¹⁴
- $s = 0,25$ para CPL, CP II classe 40
- $s = 0,38$ para CP III e CP IV

4. Redução da resistência com o nível e a duração da tensão mantida

Esse tema foi objeto de estudos pioneiros de Rüschi¹⁵ na década de 50, sendo também objeto de confirmação por outros pesquisadores^{16, 17, 18, 19}. O assunto é bastante conhecido, podendo-se extrair as principais conclusões:

- tensões acima de determinados limites, em torno de 0,7 da tensão de ruptura convencional do corpo de prova num ensaio padrão, podem, com a permanência (manutenção) durante certo período de tempo, provocar a ruptura do concreto de resistência convencional 1,0 (fenômeno da relaxação de tensões)
- com valores abaixo desse limite, o concreto tem resistência perene, apresentando, no entanto, deformação lenta (fenômeno da fluência)
- a relação entre resistência efetiva diante de tensões elevadas e mantidas e resistência convencional no ensaio normal (padrão) de compressão axial é independente da idade de início do carregamento do concreto e do tipo de concreto (se corrente, ou CAR, ou amassado com cimento tipo CPL, II, III, IV ou V)

O modelo matemático adotado pelo Model Code CEB/FIP 90² para representar esse fenômeno é:

$$k_2 = f_{ct} / f_{ct_0} = 0,96 - 0,12 \cdot \sqrt[4]{\ln 72 \cdot (t - t_0)}$$

onde:

k_2 = coeficiente de redução da resistência à compressão do concreto, pelo efeito de carga mantida

f_{ct} = resistência à compressão do concreto na idade $(t + t_0)$ sob carga elevada e constantemente mantida desde a idade t_0

f_{ct_0} = resistência à compressão convencional do concreto na idade t_0 no ensaio normal (padrão) de compressão axial

5. Resistência efetiva do concreto a qualquer idade, sob carga mantida

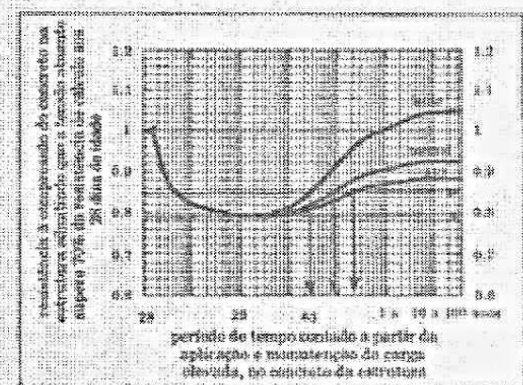
Das considerações anteriores conclui-se que a mínima resistência do concreto durante a vida útil da estrutura, deve ser o valor a ser adotado como a tensão de cálculo ou de projeto, σ_{ed} (vide Fig. 1.1 e demais modelos matemáticos apresentados).

Essa mínima tensão ("resistência") à compressão do concreto na estrutura, dependerá do nível de tensão atuante (se $\geq 0,7$), do tempo de permanência dessa tensão $(t - t_0)$ e da idade t_0 de estimativa da resistência característica do concreto.

A seguir, são analisadas as seguintes situações:

- $f_{ck,28}$ com tensão elevada, atuando a partir de 28 dias, para diferentes tipos de concreto
- $f_{ck,28}$ com tensão elevada, atuando a partir de 364 dias, para diferentes tipos de concreto
- $f_{ck,63}$ com tensão elevada, atuando a partir de 63 dias, para diferentes tipos de concreto
- $f_{ck,63}$ com tensão elevada, atuando a partir de 364 dias, para diferentes tipos de concreto²⁰

$f_{ck,28}$ com tensão elevada, atuando a



partir de 28 dias

FIGURA 5.1 Evolução da resistência à compressão do concreto, a partir de 28 dias, admitindo que nessa idade, o concre-

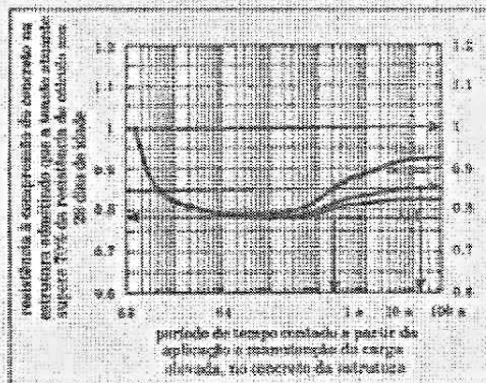
to é submetido a elevadas tensões que assim permanecem durante toda a sua vida útil. Para o caso de concretos amassados com cimento Portland, de endurecimento lento, que sigam a curva de crescimento relativo do Model Code CEB/FIP 90, o produto $k_1 \cdot k_2 = k$ deveria ser 0,79, ou seja, os valores de 0,85 e 0,80 da NBR 6118 seriam contra a segurança, pelo menos no período de 28 a 65 dias.

$f_{ck,28}$ com tensão elevada, atuando a partir de 364 dias

Estudando a evolução da resistência à compressão do concreto, a partir de 28 dias, e admitindo que o concreto é submetido a elevadas tensões a partir de 1 ano e que assim permanecem durante toda a sua vida útil, considerando o caso de concretos amassados com cimento Portland, de endurecimento lento, que sigam a curva de crescimento relativo do Model Code CEB/FIP 90, o produto $k_1 \cdot k_2 = k$ deveria ser 1,02, ou seja, os valores de 0,85 e 0,80 da NBR 6118 são contra a economia, durante toda a vida útil da estrutura. A maioria das situações efetivas de carregamento dos componentes estruturais em obras de concreto, aproxima-se desta situação, ou seja, cerca de um ano para ser solicitado com valores próximos dos máximos assumidos no dimensionamento, especialmente no caso de edifícios de vários pisos. Eventualmente, os componentes fletidos tipo laje, podem ser intensamente solicitados nas primeiras idades porém, neste caso, a resistência do concreto não é determinante da capacidade resistente da peça e portanto, não necessita ser elevada.

$f_{ck,63}$ com tensão elevada, atuando a partir de 63 dias

FIGURA 5.3 Evolução da resistência à compressão do concreto, a partir de 63 dias, admitindo que o concreto é submetido a elevadas tensões, a partir de 63 dias, e que assim permanecem durante toda a sua vida útil. Para o caso de concretos amassados com cimento Portland, de endurecimento normal, que sigam a curva de cres-



cimento relativo do Model Code CEB/FIP 90, o produto $k_1 \cdot k_2 = k$ deveria ser 0,78, ou seja, os valores de 0,85 e 0,80 da NBR 6118 seriam contra a segurança, pelo menos no período de 63 a 270 dias.

$f_{ck,63}$ com tensão elevada atuando a partir de 364 dias

Estudando a evolução da resistência à compressão do concreto, a partir de 63 dias, admitindo que o concreto é submetido a elevadas tensões, a partir de 1 ano, e que assim permanecem durante toda a sua vida útil e considerando o caso de concretos amassados com cimento Portland, de endurecimento lento, que sigam a curva de crescimento relativo do Model Code CEB/FIP 90, o produto $k_1 \cdot k_2 = k$ deveria ser 0,90, ou seja, os valores de 0,85 e 0,80 da NBR 6118 são contra a economia durante toda a vida útil da estrutura. Considerando os teores elevados de adições ativas e inativas, permitidos pela normalização vigente e comumente encontrados nos cimentos brasileiros, é conveniente aproveitar o ganho de resistência normalmente havido entre 28 e 63 dias. Em amplo estudo nacional com mais de 4.500 resultados de controle efetivo de concreto em obras, durante os anos de 89 a 93, foi obtido crescimento médio efetivo de 14%, para os cimentos tipo CPI, CPII, CPIII e CPIV, com relações água/cimento no intervalo de 0,50 a 0,60²¹.

6. Considerações finais

Este trabalho procurou mostrar, de

maneira conceitual e prática, o problema complexo que é a consideração da variação da resistência do concreto com o tempo e as implicações que isso pode acarretar no comprometimento da segurança ou da economia da estrutura, segundo sejam adotados critérios muito simplistas.

O método atual de introdução da segurança no projeto estrutural, denominado semi-probabilista, tem o enorme mérito de haver discretizado a influência de cada variável desconhecida, associando a ela, um coeficiente de desconhecimento ou de ponderação, em geral, a favor da segurança, esperando assim estimular o meio técnico a conhecer melhor aquilo que projeta e controla e, conseqüentemente, permitindo a adoção de novos parâmetros resultantes da natural evolução do conhecimento sobre o processo.

É desejo deste autor ver incorporados estes conceitos e práticas no novo texto da NBR 6118 que ora está em revisão no âmbito do Comitê Brasileiro de Construção Civil, CB-2 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, estando em discussão a proposta de texto normativo apresentado em anexo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. PROJETO E EXECUÇÃO DE OBRAS DE CONCRETO ARMADO. NBR 6118 (NB - 1). RIO DE JANEIRO, ABNT, 1978.
- 2 COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB-FIP MODEL CODE 1990. LAUSANNE, THOMAS TELFORD, 1993. (BULLETIN D'INFORMATION, 213-14)
- 3 COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. RECOMMENDATIONS INTERNATIONALES CEB/FIP POUR LE CALCUL ET L'EXECUTION DES OUVRAGES EN BÉTON. PARIS, 1972. (BUL. D'INR. 84.)
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. AÇÕES E SEGURANÇA NAS ESTRUTURAS. NBR 8681 (NB-862). RIO DE JANEIRO, ABNT, 1984.
- 5 ALGUNS AUTORES CONSIDERAM AINDA UM QUARTO (γ_{L4}), OU TERCEIRO (K_3) COEFICIENTE QUE TERIA A FINALIDADE DE PROCURAR LEVAR EM CONTA AS CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO EFETIVAS DO CONCRETO NA ESTRUTURA, QUE SÃO DIFERENTES DAS IDEAIS DE SAZONAMENTO DOS CORPOS DE PROVA DE CONTROLE, NA CÂMARA UNIDA DOS LABORATÓRIOS DE ENSAIO.
- 6 O VALOR EFETIVO DESSE COEFICIENTE ESTÁ DISCUTIDO EM VÁRIOS DOCUMENTOS E TRABALHOS, TENDO SIDO RECENTEMENTE OBJETO DE APROFUNDADO ESTUDO EXPERIMENTAL REALIZADO POR "CREMONINI, RUY A. ANÁLISE DE ESTRUTURAS ACABADAS: CONTRIBUIÇÃO PARA A DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE AS RESISTÊNCIAS POTENCIAL E EFETIVA DO CONCRETO. SÃO PAULO, ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 1994. (TESE DE DOUTORAMENTO)"
- 7 HELENE, PAULO R. L. CONTRIBUIÇÃO AO ESTABELECIMENTO DE PARÂMETROS DE DOSAGEM E CONTROLE DOS CONCRETOS DE CIMENTO PORTLAND. SÃO PAULO, ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 1987. (TESE DE DOUTORAMENTO)
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. CIMENTO PORTLAND COMUM. NBR 5732 (EB-1). RIO DE JANEIRO, ABNT, 1991.
- 9 —. CIMENTO PORTLAND COMPOSTO. NBR 11578 (EB-2138). RIO DE JANEIRO, ABNT, 1991.
- 10 —. CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO. NBR 5735 (EB-202). RIO DE JANEIRO, ABNT, 1991.
- 11 —. CIMENTO PORTLAND POZZOLÂNICO. NBR 5736 (EB-758). RIO DE JANEIRO, ABNT, 1991.
- 12 COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. CEB-FIP MODEL CODE 1990: FINAL DRAFT. LAUSANNE, 1991. (BULLETIN D'INFORMATION, 203-205)
- 13 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL. NBR 5733 (EB-2). RIO DE JANEIRO, ABNT, 1991.
- 14 ENTENDIDO COMO CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA, OU SEJA, COM $f_{ck} > 50$ MPa e

$n/c < 0,38$.

15 RÜSCH, HUBERT. RESEARCHES TOWARD A GENERAL FLEXURAL THEORY FOR STRUCTURAL CONCRETE. JOURNAL OF THE AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, JULY 1960. p.1-28

16 BOSTVIRONNOIS, JEAN-LOUIS & LARRARD, F. LES BÉTONS A HAUTES PERFORMANCES AUX FUMÉS DE SILICE PERDENT-ILS DE LA RÉSISTANCE A LONG A LONG TERME? ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, N. 491, FÉVRIER 1991. p. 26-43

17 FOURÉ, BERNARD. ÉTUDE EXPERIMENTALE DE LA RÉSISTANCE DU BÉTON SOUS CONTRAINTE SOUTINUE. ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, N. 435, JUIN 1985. p. 2-22

18 FUSCO, P.B. RESISTÊNCIA DO CONCRETO COMPRIMIDO. BRASÍLIA, 35º REIBRAC, v. 2, IBRACON, 21 A 25 JUNHO 1993. p. 467-83

19 CUNHA, JOSÉ CELSO DA. CONSIDERAÇÕES SOBRE A PESQUISA E O EMPREGO DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO. UBERABA, CIMINAS/BRASMIX/AEA UBERABA, 01 JULHO 1993.

20 SITUAÇÃO MAIS PRÓXIMA DA REALIDADE NO CASO DE EDIFICAÇÕES, CONFORME DEMONSTRADO NO EXCELENTE TRABALHO DE "CORREA, MÁRCIO R. & RAMALHO, MÁRCIO, A. CONSIDERAÇÕES SOBRE A EVOLUÇÃO DOS ESFORÇOS SOLICITANTES NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO. BRASÍLIA, RIO DE JANEIRO, BELO HORIZONTE, SÃO PAULO, PORTO ALEGRE E BELÉM, SEMINÁRIO DE DOSAGEM E CONTROLE DOS CONCRETOS ESTRUTURAI, ENCOL/SENAL, JULHO A SET. 1993."

21 DIAS, EURÍPEDES. PROGRAMA DE QUALIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO DA ENCOL. BRASÍLIA, RIO DE JANEIRO, BELO HORIZONTE, SÃO PAULO, PORTO ALEGRE E BELÉM, SEMINÁRIO DE DOSAGEM E CONTROLE DOS CONCRETOS ESTRUTURAI, ENCOL/SENAL, JULHO A

SET. 1993."

NBR 6118 Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado (ABNT)

TEXTO: (Versão de 30/11/94 → Proposta de Paulo Helene, incorpora sugestões de Fernando Stuchi e Ricardo França ao texto de 22/02/94)

A resistência de cálculo do concreto à compressão deve ser obtida a partir de:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

A tensão de cálculo do concreto à compressão σ_{cd} , nos casos de compressão simples e composta e flexão, a ser considerada no projeto deve ser:

$$\sigma_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \beta$$

onde β é um coeficiente que leva em conta quatro variáveis independentes:

→ a idade j de controle da resistência à compressão do concreto, ou seja, a idade do $f_{ck,est}$

→ a idade na qual as cargas previstas em projeto têm grande probabilidade de atuar na estrutura, em níveis iguais ou superiores a 70% do valor máximo previsto.

→ a taxa efetiva de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto com a idade.

→ a duração da carga mantida em níveis iguais ou superiores a 70% do valor máximo previsto.

Nos casos usuais, empregar:

$$\sigma_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot 0,85$$

Comentários:

Esse coeficiente β , que nos casos usuais é 0,85, está afetado pelo fenômeno da relaxação das tensões resistentes do concreto por efeito da manutenção das cargas atuantes por longa duração (acima de 15 minutos), também conhecido no país por efeito Rüschi¹, pela taxa efetiva de crescimento relativo da resis-

idade à compressão do concreto com a idade, que depende do tipo de cimento e da relação água/cimento, utilizados no concreto, e da idade na qual as cargas previstas em projeto, têm grande probabilidade de atuar, efetivamente, na estrutura, em níveis iguais ou superiores a 70% do valor máximo previsto em projeto.

O fenômeno da relaxação das tensões resistentes pode ser assim modelado²:

$$\frac{f_{\text{cul,tus}}}{f_{\text{cm}}} = 0,96 - 0,12 \cdot \sqrt[4]{\ln(72 \cdot \Delta t)}$$

* com $f_{\text{cul,tus}}$ = carga mantida durante o período de tempo Δt (em dias), contado a partir da idade de carregamento, t (em dias).

O período de tempo Δt (em dias) durante o qual a carga é mantida em níveis acima de 70% da máxima pre-

vista, deve ser levado em conta, somente para períodos de tempo iguais ou superiores a 15 minutos. Grandes cargas, atuando em períodos de tempo inferiores a essa referência, tais como rajadas de vento e cargas cíclicas, devem ser analisadas sob outros enfoques, tais como ressonância e fadiga.

O fenômeno de evolução da resistência à compressão do concreto com o tempo pode ser assim modelado³:

$$\frac{f_{\text{cm,t}}}{f_{\text{cm,j}}} = \frac{a}{b \cdot \sqrt[4]{t}}$$

* com $f_{\text{cm,t}}$ = resistência à compressão numa idade qualquer t (em dias), com a e b dependentes do tipo de cimento e da relação água/cimento (ou nível de resistência) conforme capítulo de propriedades dos materiais, exemplificado na Tabela 3 abaixo:

TABELA. Coeficientes de evolução relativa da resistência à compressão com a idade, $f_{\text{cm,t}}/f_{\text{cm,28}}$

Tipo de cimento	Relação a/c	$f_{\text{cm,28}}$ MPa	Coeficiente médio de crescimento da resistência à compressão do concreto, relativo a 28 d				Formulação geral	
			3d	7d	28d	91d	$\frac{f_{\text{cm,t}}}{f_{\text{cm,28}}} = \frac{a}{b \cdot \sqrt[4]{t}}$	
norma	(kg/kg)	MPa						
CP I-CP I-S NBR 5732 (Portland comum)	0,38 0,48 0,58 0,68 0,78	43 35 28 23 18	0,54 0,69 0,82 0,96 0,94	0,74 0,71 0,86 0,84 0,98	1 1 1 1 1	1,14 1,15 1,20 1,25 1,36	1,14 1,15 1,20 1,25 1,36	$a = 1,35$ $b = 4,99$ $a = 1,41$ $b = 6,13$ $a = 1,52$ $b = 9,37$ $a = 1,64$ $b = 13,6$ $a = 1,69$ $b = 16,2$
CP II-B/CP II-Z/ CP II-F NBR 11578 (Portland composto)	0,38 0,48 0,58 0,68 0,78	46 38 31 26 21	0,51 0,67 0,80 0,95 0,93	0,73 0,69 0,84 0,80 0,97	1 1 1 1 1	1,16 1,19 1,22 1,26 1,28	1,16 1,19 1,22 1,26 1,28	$a = 1,49$ $b = 5,84$ $a = 1,45$ $b = 7,14$ $a = 1,56$ $b = 10,6$ $a = 1,68$ $b = 15,3$ $a = 1,73$ $b = 19,2$
CP III NBR 5735 (Portland de alto forno)	0,38 0,48 0,58 0,68 0,78	51 40 32 26 20	0,38 0,56 0,78 0,92 0,92	0,62 0,61 0,74 0,82 0,88	1 1 1 1 1	1,22 1,25 1,31 1,34 1,35	1,22 1,25 1,31 1,34 1,35	$a = 1,69$ $b = 17,2$ $a = 1,65$ $b = 14,2$ $a = 1,84$ $b = 25,3$ $a = 1,94$ $b = 37,9$ $a = 1,98$ $b = 48,6$
CP VI NBR 5736 (Portland Pozolânico)	0,38 0,48 0,58 0,68 0,78	49 41 33 27 21	0,59 0,68 0,80 0,93 0,95	0,71 0,70 0,84 0,80 0,88	1 1 1 1 1	1,16 1,17 1,21 1,26 1,30	1,16 1,17 1,21 1,26 1,30	$a = 1,40$ $b = 5,93$ $a = 1,43$ $b = 6,99$ $a = 1,55$ $b = 10,3$ $a = 1,66$ $b = 15,5$ $a = 1,83$ $b = 23,2$
CP V-ARI NBR 5733 (Portland de alta resistência inicial)	0,38 0,48 0,58 0,68 0,78	55 42 36 29 23	0,69 0,82 0,93 0,96 0,93	0,86 0,83 0,77 0,71 0,69	1 1 1 1 1	1,04 1,09 1,08 1,11 1,13	1,04 1,09 1,08 1,11 1,13	$a = 1,44$ $b = 2,39$ $a = 1,19$ $b = 3,11$ $a = 1,26$ $b = 4,52$ $a = 1,53$ $b = 6,46$ $a = 1,40$ $b = 7,74$

* referido aos cimentos de classe 32, a exceção do cimento CP V-ARI.

Combinando esses dois fenômenos, com a influência da idade de atuação efetiva das cargas na estrutura, pode-se obter o valor de β , conforme apresentado na Figuras 1, 2 e 3, a título meramente ilustrativo.

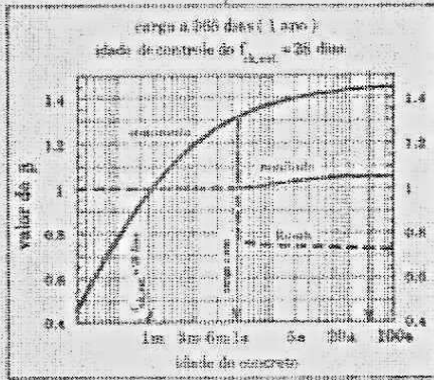


FIGURA 1. EXEMPLO PARA $f_{ck,est}$ CONTROLADO AOS 28 DIAS DE IDADE, CARGA EFETIVA AOS 365 DIAS E CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA COM CIMENTO CP III.

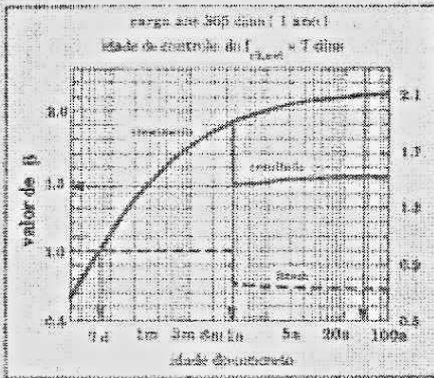


FIGURA 2. EXEMPLO PARA $f_{ck,est}$ CONTROLADO AOS 7 DIAS DE IDADE, CARGA EFETIVA AOS 365 DIAS E CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA COM CIMENTO CP IV.

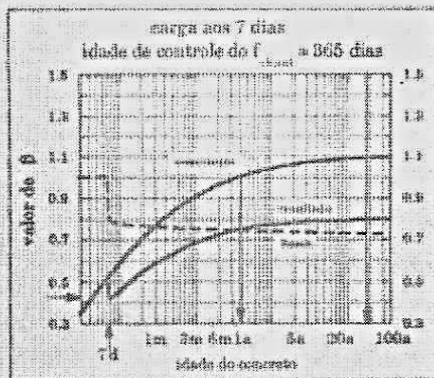


FIGURA 3. EXEMPLO PARA $f_{ck,est}$ CONTROLADO AOS 365 DIAS (1 ANO), CARGA EFETIVA AOS 7 DIAS E CONCRETO DE RESISTÊNCIA NORMAL COM CIMENTO CP II.

TEXTO:

O valor de β pode ser desdobrado em:

$$\sigma_{cd} = \frac{f_{cd,j}}{\gamma_c} \cdot \beta_j \cdot \beta_i \cdot \beta_{cl}$$

onde:

a duração da carga está admitida como sendo sempre superior a 15 minutos; $f_{cd,j}$, $f_{cd,j}$ e γ_c têm o significado usual; e,

$\beta_j \rightarrow$ é um coeficiente que leva em conta a idade na qual é referido o controle, ou seja, a idade na qual é medida a resistência característica do concreto à compressão, $f_{ck,est}$. Será tanto menor quanto maior essa idade, J , de referência do controle da resistência.

Valores de β_j a serem adotados.

coeficiente	casos usuais 28 dias	idade de controle da resistência à compressão do concreto $\rightarrow f_{ck,j}$			
		7 dias	63 dias	91 dias	1 ano
β_j	0,85	1,10	0,80	0,78	0,79

$\beta_i \rightarrow$ é um coeficiente que leva em conta a idade, na qual o carregamento efetivo tem grande probabilidade de atingir 70% do carregamento adotado no projeto estrutural. Será tanto maior quanto mais tarde for esse carregamento.

Valores de β_i a serem adotados.

coeficiente	casos usuais 28 dias	carregamento maior a 70% do previsto no projeto, após			
		7 dias	63 dias	91 dias	1 ano
β_i	1,00	0,80	1,08	1,12	1,20

$\beta_{cl} \rightarrow$ é um coeficiente que depende do crescimento efetivo da resistência do concreto com a idade, ou seja, leva em conta a natureza do cimento,

efetivamente utilizado, e a relação água/cimento efetiva do concreto. Será tanto maior, quanto maior for o crescimento relativo da resistência à compressão do concreto com a idade.

Valores de β_{ct} a serem adotados.

classe do concreto	tipo de cimento		
	CP I e CP II	CP III e CP IV	CP V
10 a 35	1,00	1,10	0,90
40 a 50	0,90	0,95	0,85

obs.: o produto de $\beta_j \cdot \beta_t \cdot \beta_{ct}$, pode variar no intervalo de :

mínimo \rightarrow 0,40 para carga efetiva aos 7 dias, com concreto de resistência usual (10 a 35MPa), cimento tipo CP III ou CP IV, com $f_{ck,est}$ de referência controlado aos 364 dias (1ano). Este é um exemplo extremo que não se recomenda, pois sempre a comprovação da resistência à compressão, característica estimada do concreto, $f_{ck,est}$ deve prevalecer à atuação das cargas, salvo quando se tratar de verificação de estruturas acabadas ou

eventuais mudanças de uso.

usual \rightarrow 0,85 para os casos usuais, ou seja, carga efetiva após 91 dias, com concreto de resistência usual (10 a 35 MPa), cimento do tipo CP I ou CP II, com $f_{ck,est}$ de referência, controlado aos 28 dias.

máximo \rightarrow 1,45 para carga efetiva aos 364 dias (1 ano), com concreto de resistência usual (10 a 35 MPa), com cimento tipo CP III e CP IV, com $f_{ck,est}$ de referência, controlado aos 7 dias⁴.

.....

- 1- RÜSCH, Hubert. Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete. Journal of the American Concrete Institute, July 1960. p.1-28
- 2- COMITE EURO-INTERNATIONAL do BETON. CEB-FIP Model Code 1990. Lausanne, Thomas Telford, May 1993. (Bulletin d'Information, 203-205)
- 3- HELENE, Paulo R. L. Contribuição ao Estabelecimento de Parâmetros de Dosagem e Controle dos Concretos de Cimento Portland. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1987. (tese de doutoramento)
- 4- HELENE, Paulo R.L. A Resistência do Concreto sob Carga Mantida e a Idade de Estimativa da Resistência Característica. São Paulo, Anais do III Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, Epusp / PEF, 1 a 3 dez. 1993. p. 271-82