

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

HELENE, P. R. L. (EPUSP)

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

HELENE, Paulo R. L.

Eng. Civil, Doutor em Engenharia, Prof. Associado EPUSP, C. Postal 61548, SP 05424-970, BRASIL

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 país por efeito Rüsçh, está considerado no atual método semi-probabilista de introdução da segurança no projeto estrutural, normalizado pela NBR 6118 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.

Essa maneira indireta de introdução da segurança no projeto estrutural dá margem a diferentes interpretações desse coeficiente, principalmente associando-o 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/90", comparando-o com índices nacionais confiáveis de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto com a idade.

Abstract

The strength of the concrete in a structure depends of the age at which the structure is loaded. With stresses from 70% to 80% of the compressive strength of the concrete it is necessary to take into account the effect of the creep.

This phenomenon is known in Brazil as Rüsçh effect and considered in the semi-probabilistic structural desing process adopted by the present Brazilian standard NBR 6118/78. However, this effect is not directly mentioned in the standard, but only presented as an extra reduction factor for the compressive strength of the concrete, which value is 0.80 or 0.85 (based on the type of the load).

This indirect way of safety approach in the structure design conducts to various hypothesis for the actual purpose of this factor including the age for the definition of the characteristic compressive strength of the concrete.

This paper discusses the effective strength of the concrete in a structure from the point of view of the "Model Code CEB/90" and makes comparisons with national data for the relative compressive strength increase with the age of the concrete.

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 "Comitê Euro-Internacional du Béton - CEB"¹, 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.

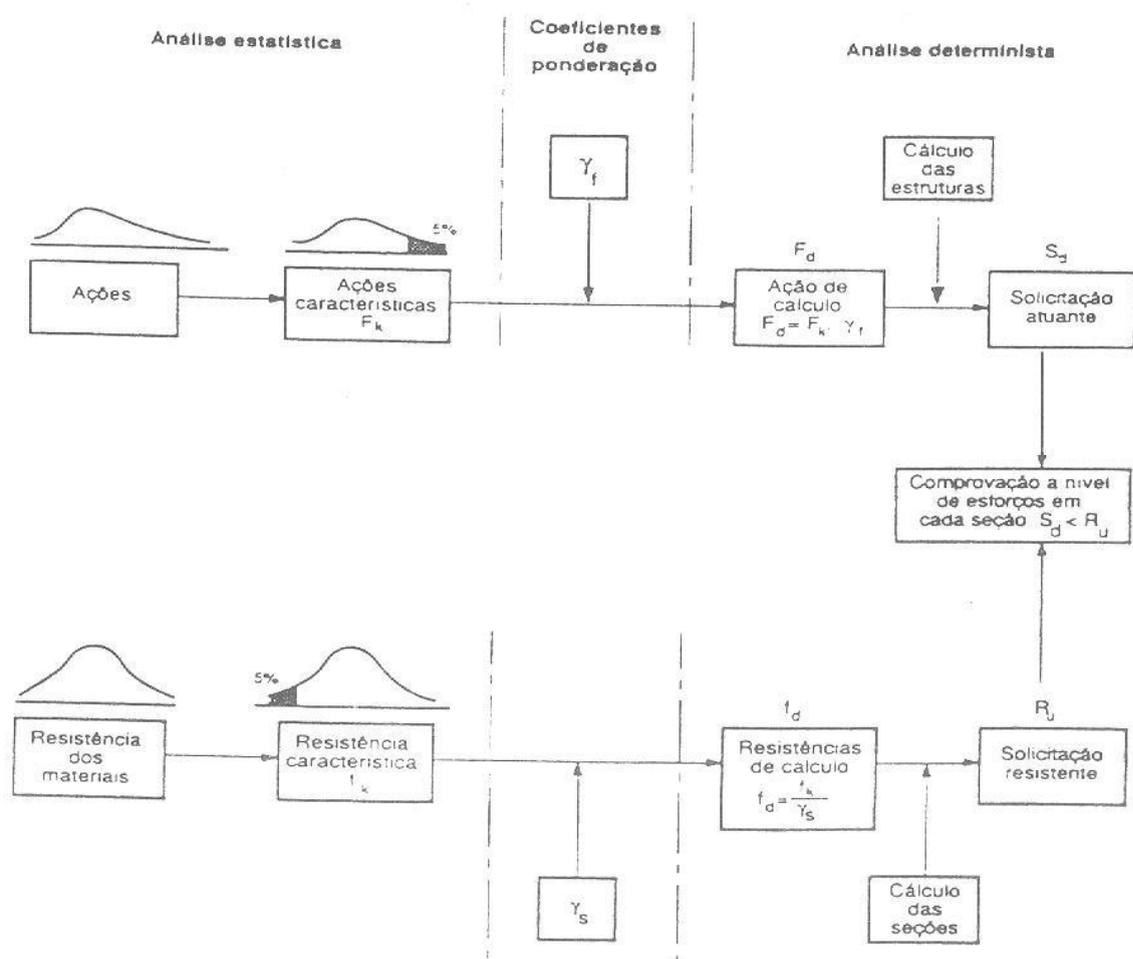


FIGURA 1.1 Esquema simplificado da sequência a seguir no dimensionamento de estruturas pelo método semi-probabilista recomendado pela NBR 6118.

Para considerar as outras variáveis cujas distribuições são ainda desconhecidas ou não quantificáveis, são introduzidos coeficientes de ponderação parciais. 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 relativo às ações e ao processo de cálculo.

2. A resistência de projeto

Segundo a NBR 8681 Ações e Segurança, os coeficientes de minoração da resistência dos materiais, γ_m , são o 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), em um ensaio instantâneo (≤ 15 minutos), com aplicação lenta da carga (tensão/tempo controlado e dentro de certa faixa), carregamento contínuo (não cíclico), e estático (não dinâmico), é de se esperar que a resistência à compressão efetiva do concreto na estrutura seja diferente do valor medido no ensaio padrão.

A NBR 8681 admite o γ_c (coeficiente de minoração da resistência do concreto) como resultado do produto de três coeficientes, a saber;

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

$\gamma_c = 1,3$ a $1,5$, dependendo das condições particulares de execução da estrutura²

$\gamma_{c1} =$ da ordem de $1,2 \rightarrow$ procura compensar o fato da resistência do concreto na estrutura apresentar uma variabilidade superior à variabilidade da resistência do concreto na "boca" da betoneira

$\gamma_{c2} =$ da ordem de $1,05 \rightarrow$ procura compensar a diferença de geometria entre a do corpo de prova cilíndrico padrão e aquela geometria efetiva dos componentes estruturais

$\gamma_{c3} =$ da ordem de $1,1 \rightarrow$ 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 data²

$k_1 = 1,2$ a $2,0 \rightarrow$ 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, 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 $1,0 \rightarrow$ 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 resistência de projeto ou de dimensionamento pode ser expressa por;

$$f_{cd} = f_{ck} \cdot k / \gamma_c \rightarrow f_{cd} = f_{ck} / 1,4 \cdot 0,85 \text{ (caso geral da NBR 6118)} = 0,61 f_{ck}$$

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

na qual f_{ck,t_0} é a resistência característica do concreto, estimada na idade t_0 , geralmente de 28 dias. Em princípio, representa adotar esse valor de cálculo, f_{cd} , como 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 conhecido, 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 com a manutenção e 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 autor³ como parte de sua tese de doutoramento, foram estudados todos os cimentos Portland brasileiros provenientes de todas as fábricas nacionais, com traços de relação água/cimento de 0,38, 0,48, 0,58, 0,68 e 0,78, comprovando-se claramente 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 cimentos nacionais.

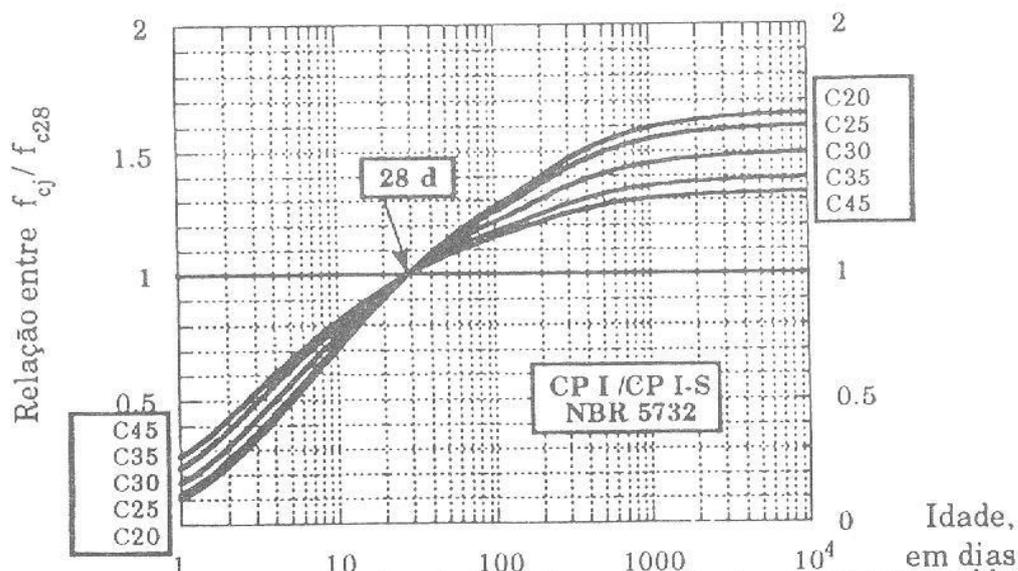


FIGURA 3.1 Crescimento relativo da resistência à compressão do concreto com a idade, tomando-se como referência f_{c28} , para o CP I (NBR 5732).

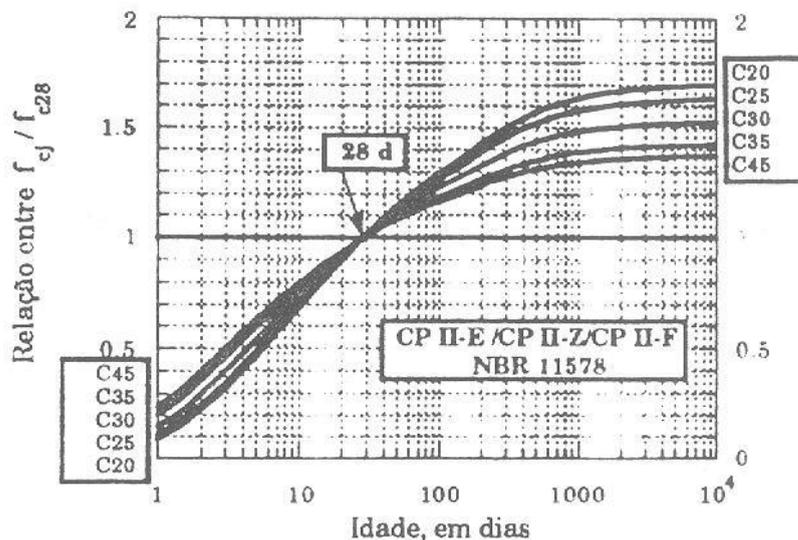


FIGURA 3.2 Crescimento relativo da resistência à compressão do concreto com a idade, tomando-se como referência f_{c28} , para o CP II (NBR 11578).

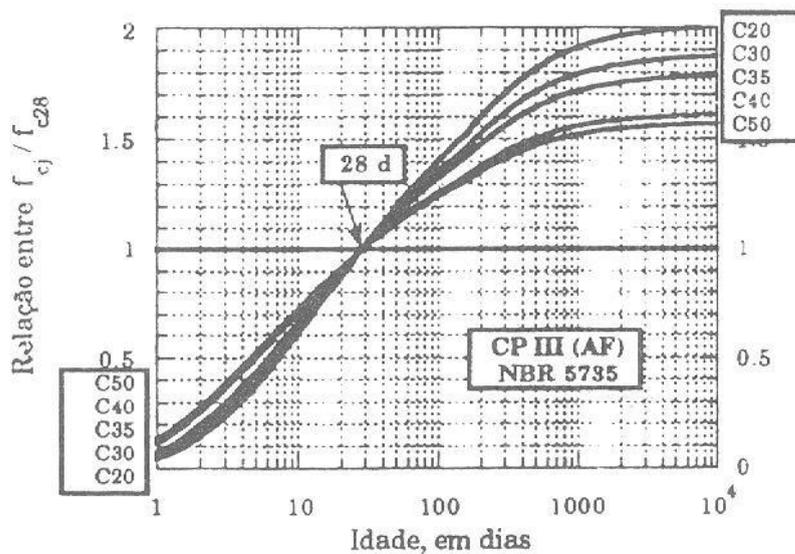


FIGURA 3.3 Crescimento relativo da resistência à compressão do concreto com a idade, tomando-se como referência f_{c28} , para o CP III (NBR 5735).

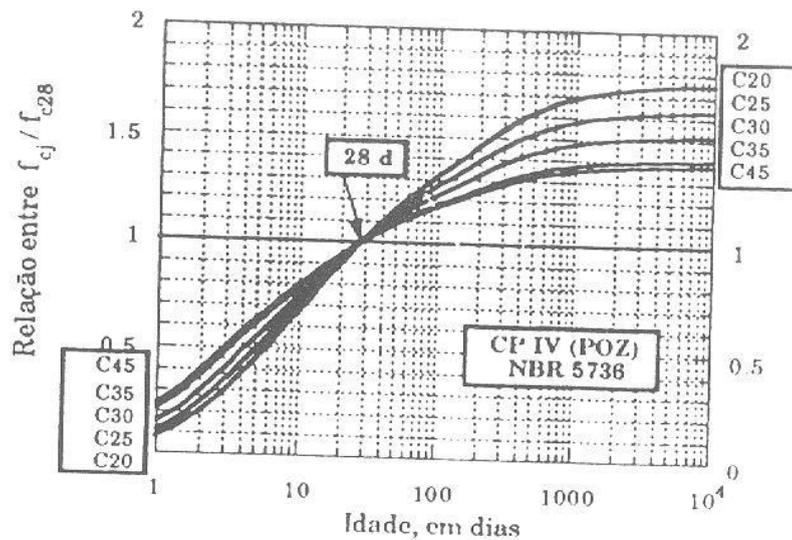


FIGURA 3.4 Crescimento relativo da resistência à compressão do concreto com a idade, tomando-se como referência f_{c28} , para o CP IV (NBR 5736).

O Model Code CEB/FIP - 90⁴, apresenta a seguinte formulação simplificada e conservadora para a evolução da resistência à compressão com o tempo:

$$k_1 = f_{c,t} / f_{c28} = e^{s[1 - \sqrt{28/t}]} \quad \text{onde;}$$

- k_1 = coeficiente de crescimento relativo da resistência à compressão do concreto (neste caso crescimento relativo referido à idade de $t_0 = 28$ dias)
 $f_{c,t}$ = 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 ARI e CAR
 $s = 0,25$ para CP I, 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 Rüsçh⁵ na década de 50, sendo também objeto de confirmação por outros pesquisadores^{6,7,8,9}. 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, podem, com a permanência 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 com deformação lenta (fenômeno da fluência)

- a relação entre resistência efetiva diante de tensões elevadas e mantidas e resistência convencional no ensaio normal de compressão axial é independente da idade de início do carregamento do concreto e do tipo de concreto (corrente, CAR, com CPI, II, III, IV ou ARI)

O modelo matemático adotado pelo Model Code CEB/FIP 90 para representar esse fenômeno é;

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

onde;

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

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

f_{c,t_0} = resistência à compressão convencional do concreto na idade t_0 no ensaio normal 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 resistência de cálculo ou de projeto, f_{cd} (vide Fig. 1.1) e demais modelos matemáticos apresentados.

Essa mínima resistência à compressão do concreto na estrutura dependerá do nível de tensão atuante ($\geq 0,7$), 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 d¹⁰, 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 concreto

5.1 $f_{ck,28}$ com tensão elevada atuando a partir de 28 dias

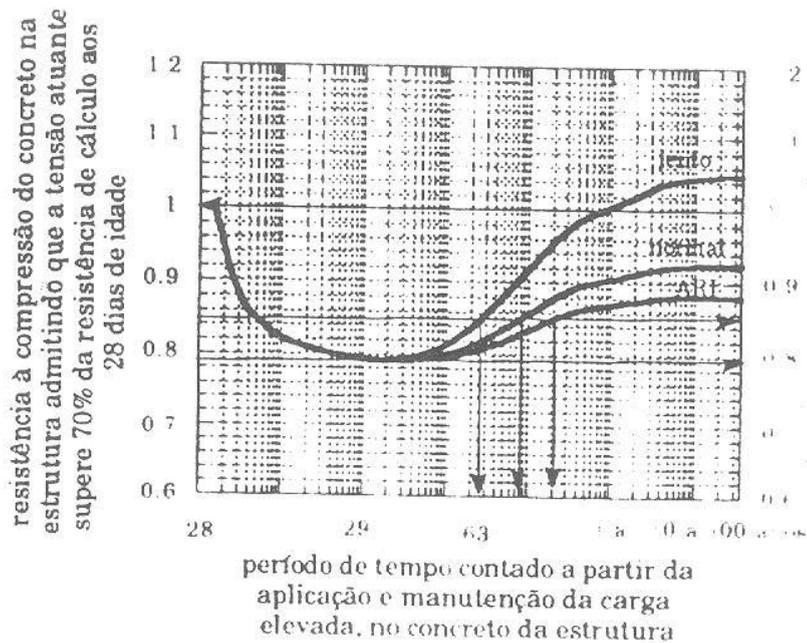


FIGURA 5.1.1 Evolução da resistência à compressão do concreto a partir de 28 dias admitindo que nessa idade o concreto é submetido a elevadas tensões que assim permanecem durante toda a sua vida útil. Para o caso de concretos amassados com cimento Portland de endurecimento lento que sigam a curva de crescimento relativo do Model Code CEB/FIP 90, o produto $k_1 \cdot k_2 = k$ deveria ser 0,79, ou seja, o valor de 0,85 da NBR 6118 seria contra a segurança, pelo menos no período de 28 dias a 65 dias

5.2 $f_{ck,28}$ com tensão elevada atuando a partir de 364 dias

Estudando a evolução da resistência à compressão do concreto a partir de 28 dias 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 1,02, ou seja, o valor de 0,85 da NBR 6118 seria contra a economia durante toda a vida útil da estrutura.

5.3 $f_{ck,63}$ com tensão elevada atuando a partir de 63 dias

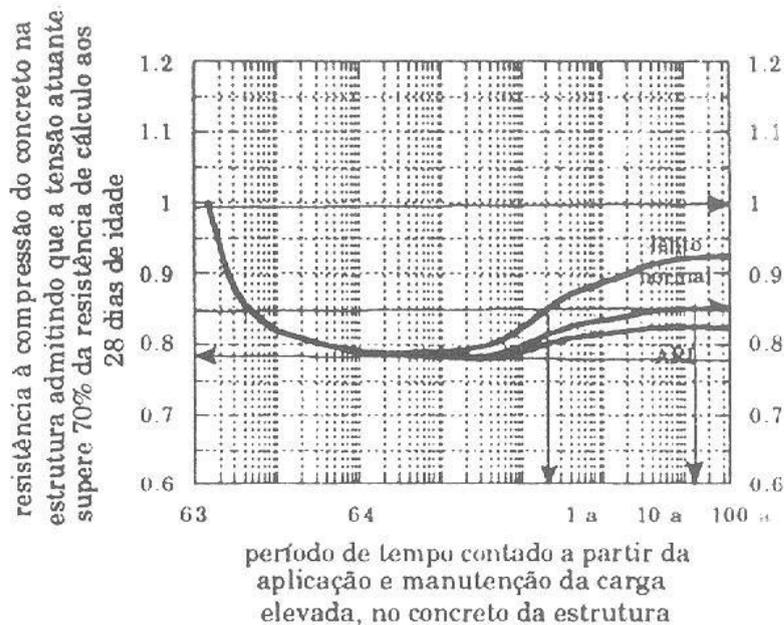


FIGURA 5.3.1 Evolução da resistência à compressão do concreto a partir de 63 dias admitindo que o concreto é submetido a elevadas tensões a partir de 63 dias e que assim permanecem durante toda a sua vida útil. Para o caso de concretos amassados com cimento Portland de endurecimento normal que sigam a curva de crescimento relativo do Model Code CEB/FIP 90, o produto $k_1 \cdot k_2 = k$ deveria ser 0,78, ou seja, o valor de 0,85 da NBR 6118 seria contra a segurança, pelo menos no período de 63 a 270 dias.

5.4 $f_{ck,63}$ 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, o valor de 0,85 da NBR 6118 seria contra a economia durante toda a vida útil da estrutura.

6. Considerações finais

Este trabalho procura 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, 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.

Referências bibliográficas

- 1 COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. **Recommendations Internationales CEB/FIP pour le Calcul et l'Execution des Ouvrages en Béton**. Paris, 1972. (Bul. d'Inf. 84.)
- 2 Alguns autores consideram ainda um terceiro (k_3) ou quarto (γ_{c4}) 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 sazonalidade dos corpos de prova de controle, na câmara úmida dos laboratórios de ensaio.
- 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 COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. **CEB-FIP Model Code 1990: final draft**. Lausanne, 1991. (Bulletin d'Information, 203-205)
- 5 RÜSCH, Hubert. Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete. **Journal of the American Concrete Institute**, July 1960. p.1-28
- 6 BOSTVIRONNOIS, Jean-Louis & LARRARD, F. Les Bétons à Hautes Performances aux Fumés de Silice Perdent-ils de la Résistance à Long à Long Terme? **Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics**, n. 491, Février 1991. p. 26-43
- 7 FOURÉ, Bernard. Étude Experimentale de la Résistance du Béton sous Contrainte Soutenue. **Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics**, n. 435, Juin 1985. p. 2-22
- 8 FUSCO, P. B. Resistência do Concreto Comprimido. Brasília, 35° REIBRAC, v. 2, IBRACON, 21 a 25 junho 1993. p. 467-83
- 9 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.
- 10 Data mais realista para 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 Estruturais**, ENCOL/SENAI, julho a set. 1993.