

# Estruturas de concreto: contribuição à análise da segurança em estruturas existentes – Parte II

DOUGLAS COUTO • MARIANA CARVALHO • ANDRÉ CINTRA • PAULO HELENE

PhD ENGENHARIA

## 4. AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS EXISTENTES

Apresentam-se algumas prescrições de normas nacionais e internacionais reconhecidas e respeitadas no Brasil. O foco principal é analisar questões de tecnologia do concreto e da avaliação e verificação da segurança nas estruturas existentes, respondendo às seguintes perguntas básicas:

- ▶ Como obter a resistência característica do concreto equivalente à do corpo de prova moldado, a partir de testemunhos extraídos?
- ▶ Quais são os parâmetros principais de segurança a serem considerados na análise de estruturas existentes?
- ▶ Quais são as diferenças com relação aos parâmetros usuais de projeto utilizados para obras novas?

### 4.1 Caso geral e normalização brasileira

Para avaliação da resistência à compressão do concreto em estruturas existentes com o fim de verificar a segurança da estrutura, deve-se empregar

os conceitos e prescrições das normas ABNT NBR 8681:2003, ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 7680:2015. Sendo esta última, a norma mais adequada e recente.

Portanto, considerando que a resistência do aço não se altera com o tempo (desde que conservado dentro de um bom concreto), a incógnita maior é sempre a resistência característica do concreto à compressão, aos 28 dias de idade, convencionada como  $f_{ck}$  e aferida pelas normas ABNT NBR 12655, ABNT NBR 5738 e ABNT NBR 5739.

No caso de estruturas existentes, essa resistência deverá ser aferida a partir da resistência de testemunhos extraídos a uma idade diferente de 28 dias, que pode ser denominada resistência extraída  $f_{c,ext}$ . Para obter  $f_{ck}$  a partir de  $f_{c,ext}$ , a ABNT NBR 7680:2015 prescreve uma série de procedimentos padronizados de correção, que levam em conta as diferenças entre a resistência medida no concreto retirado da boca da betoneira e submetido a condições ideais de norma ( $f_{ck}$ ) e a resistência efetiva do concreto na obra ( $f_{c,ext}$ ), com o objetivo de obter, com essas correções,

a sua máxima resistência potencial.

#### Primeiro passo

Portanto, o primeiro passo será esse, ou seja, o de vistoriar e analisar a estrutura obtendo um  $f_{ck,equivalente}$  a partir de um  $f_{c,ext}$ , comparando-o com a resistência de projeto,  $f_{ck}$ . Uma vez que  $f_{ck,equivalente} \geq f_{ck}$  de projeto, a análise ou verificação da segurança pode ser considerada atendida e aprovada.

Caso  $f_{ck,equivalente} < f_{ck}$  de projeto, a verificação da segurança deve prosseguir com o segundo passo, que é verificar a segurança com esse novo  $f_{ck}$ .

#### Segundo passo

Para a reavaliação e verificação da segurança estrutural e da estabilidade global, considerando o Estado Limite Último (ELU), a ABNT NBR 6118:2014, no seu item 12.4.1, admite que, no caso de  $f_{ck}$  obtido a partir de testemunhos extraídos da estrutura, seja adotado:

$$\gamma_c = \frac{\gamma_{c,original}}{1,1}$$

[1]

Portanto, nos casos usuais,  $\gamma_c = 1,4/1,1 = 1,27$ , o que equivale matematicamente a multiplicar o resultado obtido de resistência do testemunho por 1,1, ou seja, aumentá-lo em 10%, uma vez que o testemunho representa melhor a resistência efetiva do concreto na obra, no entorno daquela região de extração. Para fins de verificação dos ELS, deve ser adotado  $\gamma_c = 1,0$ .

Caso a segurança verificada com esse novo  $\gamma_c$  de 1,27 ou 1,0 seja atendida, o processo pode encerrar-se neste momento.

### Terceiro passo

Caso a conformidade ainda não seja atendida, a verificação da segurança pode prosseguir com o terceiro passo, que é a observação cuidadosa da estrutura acabada conferindo medidas geométricas, posição de armadura, taxa de armadura, tolerâncias de excentricidade, de nível e de prumo, espessura de lajes, ou seja, conferir o rigor de execução da estrutura.

Nesta última etapa, também é conveniente revisar por amostragem as massas específicas dos materiais, calcular a variabilidade da resistência do concreto, revisar cuidadosamente as cargas médias e sua variabilidade e também verificar a simultaneidade de cargas.

Caso o rigor da execução esteja dentro dos limites de tolerância conforme descritos na ABNT NBR 14931:2004 [18] (equivalente aos Capítulos 5 e 6 do *ACI 318-11* e ao Capítulo 8 do *fib Model Code 2010*), a verificação da segurança poderá adotar coeficientes de minoração da resistência do concreto  $\gamma_c$  menores que 1,27 e do aço,  $\gamma_s$  de 1,05 para ELU, além de realizar a verificação com os valores efetivos das cargas (massa específica efetiva), simultaneidade efetiva, etc.

### Quarto passo

Permanecendo a não conformidade da segurança estrutural para aquelas condições de uso, escolher entre as seguintes alternativas:

- ▶ determinar as restrições de uso da estrutura;
- ▶ providenciar o projeto de reforço;
- ▶ decidir pela demolição parcial ou total.

## 4.2 Normalização internacional

Normas internacionais apresentam metodologias de análise de estruturas existentes similares e aderentes a esses conceitos, principalmente com os dois primeiros passos, sendo aplicáveis também os dois últimos passos.

### 4.2.1 ACI 318-II BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE AND COMMENTARY [19] E ACI 214.4R-10 GUIDE FOR OBTAINING CORES AND INTERPRETING COMPRESSIVE STRENGTH RESULTS [20]

#### Estruturas em construção: primeiro passo

Durante o controle do concreto numa obra em construção e frente a resultados baixos de resistências à compressão do concreto, o *ACI 318-11* (Capítulo 5, item 5.6.5) solicita a extração de três testemunhos da região afetada.

Caso a média dos três testemunhos seja superior a 85% da resistência do projeto ( $f'_c$ ) e nenhum testemunho apresente resistência inferior a 75% de  $f'_c$ , a estrutura deve ser considerada adequada e o processo encerra-se aqui, e pode-se associar essa etapa a um primeiro passo.

Observa-se que esta prescrição equivale a multiplicar, respectivamente, a média e o menor valor do testemunho extraído por 1,18 e 1,33, ou seja,  $f_{ck, equivalente} = 1,18 \cdot f_{cm, ext}$  ou  $f_{ck, equivalente} = 1,33 \cdot f_{c, mínimo, ext}$ .

#### Estruturas existentes: primeiro passo

Quando o primeiro passo não alcança a conformidade ou sempre que se trate de estruturas existentes, o *ACI 318-11* (Capítulo 20) prescreve a estimativa de uma resistência equivalente  $f'_c$  de uma forma mais apurada, através do *ACI 214.4R-10*, onde devem ser considerados alguns coeficientes de correção, relativos a fatores de ensaio, geometria e sazonalamento do testemunho, sendo:

$$f_c = F_{l/d} \cdot F_{dia} \cdot F_{mc} \cdot F_d \cdot f_{core} \quad [2]$$

Onde:

$f_c$  = resistência do testemunho corrigida;

$f_{core}$  = resistência do testemunho, obtida diretamente no ensaio de compressão;

$F_{l/d}$  = fator de correção devido à relação altura/diâmetro do testemunho;

$F_{dia}$  = fator de correção devido ao diâmetro do testemunho;

$F_{mc}$  = fator de correção devido à umidade/sazonamento;

$F_d$  = fator de correção devido ao efeito deletério do broqueamento.

Após a correção da resistência de cada testemunho, relativa às variáveis de ensaio e questões intrínsecas do concreto, o *ACI 214.4R-10* recomenda dois métodos para se obter a resistência equivalente final do concreto. São eles:

#### → Tolerance factor method

$$f'_{c, eq} = \bar{f}'_c - \sqrt{(K \cdot s_c)^2 + (Z \cdot s_a)^2} \quad [3]$$

► Tabela 4.1 – Fatores de redução das resistências ( $\phi$ ) segundo o ACI 318-11

Fator de redução das resistências	Capítulo 9 (projeto de novas estruturas)	Capítulo 20 (avaliação de estruturas existentes)	Diferença %
Tension-controlled sections	0,9	1,0	11,1
Compression controlled sections			
Members with spiral reinforcement	0,75	0,9	20,0
Other reinforced members	0,65	0,8	23,1
Shear and torsion	0,75	0,8	6,7
Bearing on concrete	0,65	0,8	23,1

Onde:

$f'_{c,eq}$  = resistência equivalente da amostra;  
 $f_c$  = média das resistências equivalentes dos testemunhos ensaiados;

$K$  = fator que leva em conta o limite de tolerância unilateral para um quantil de 10% (ACI 214.4R-10, Table 9.2), que depende do nível de confiança desejado no cálculo;

$s_c$  = desvio padrão da amostra;

$Z$  = fator que leva em conta as incertezas do uso de fatores de correção da resistência (ACI 214.4R-10, Table 9.3) e também depende do nível de confiança desejado;

$s_a$  = desvio padrão dos fatores de correção da resistência (ACI 214.4R-10, Table 9.1).

#### → Alternative method

$$\begin{aligned} (\bar{f}_c)_{CL} &= \bar{f}_c - \sqrt{\frac{(T \cdot s_c)^2}{n} + (Z \cdot s_a)^2} \\ f'_{c,eq} &= C \cdot (\bar{f}_c)_{CL} \end{aligned} \quad [4]$$

Onde:

$f'_{c,eq}$  = resistência equivalente da amostra;  
 $f_c$  = média das resistências equivalentes dos testemunhos ensaiados;

$T$  = fator obtido via distribuição  $t$  de Student com  $n-1$  graus de liberdade,

depende do nível de confiança desejado (ACI 214.4R-10, Table 9.4);

$s_c$  = desvio padrão da amostra;

$Z$  = fator que leva em conta as incertezas do uso de fatores de correção da resistência (ACI 214.4R-10, Table 9.3) e também depende do nível de confiança desejado;

$s_a$  = desvio padrão dos fatores de correção da resistência (ACI 214.4R-10, Table 9.1);

$n$  = número de testemunhos ensaiados;  
 $C$  = coeficiente atrelado à variabilidade intrínseca das resistências na estrutura (ACI 214.4R-10, Table 9.5).

#### Segundo passo: estruturas novas em construção ou existentes

Caso a resistência equivalente, obtida pelo ACI 214.4R-10, não atenda à resistência de projeto, deve ser verificada a segurança adotando-se novos coeficientes de minoração das resistências do concreto, denominados de fatores de redução das resistências ( $\phi$ ), constantes no ACI 318-11, Capítulo 20, conforme se apresenta na Tabela 4.1.

Apesar de estarem contidos nos mesmos conceitos do caso geral adotado pela normalização brasileira, o

ACI 318-11 não prescreve um único coeficiente de minoração da resistência do concreto,  $\gamma_c$ , e na verificação da segurança em estruturas existentes varia a redução desse coeficiente de 6,7% a 23,1% segundo a natureza do esforço principal, enquanto no Brasil essa redução é fixa, conservadora e igual a apenas 10% (apesar da antiga ABNT NBR 6118, de 1978 a 2003, permitir reduzir de 15% em certos casos).

O terceiro e o quarto passos, citados anteriormente no caso geral, não são explícitos no ACI 318-11, mas, obviamente, são aplicáveis.

#### 4.2.2 ACI 562-13 CODE REQUIREMENTS FOR EVALUATION, REPAIR, AND REHABILITATION OF CONCRETE BUILDING AND COMMENTARY [21]

Este novo documento propõe uma avaliação preliminar, que inclui a revisão de plantas, dados da construção, relatórios e outros documentos disponíveis (obtenção de informações sobre os materiais) e a comparação das informações obtidas com as prescrições da norma utilizada na época do projeto.

Caso não seja possível obter informações suficientes por meio de projetos, especificações e outros documentos, considerar valor de resistência à compressão do concreto estrutural conforme Table 6.3.1a, ou partir para ensaios in loco de extração de testemunhos e em laboratório, no intuito de conhecer as características do concreto.

Quando se decidir por ensaiar testemunhos extraídos, recomenda-se estimar a resistência equivalente ( $f_{c,eq}$ ) através da equação:

$$f_{c,eq} = 0,9 \cdot f'_c \left[ 1 - 1,28 \sqrt{\frac{(k_c V)^2}{n} + 0,0015} \right] \quad [5]$$

Onde:

$f_{ceq}$  = resistência à compressão equivalente do concreto;

$f_c$  = média das resistências dos testemunhos, já modificadas para considerar os diâmetros e as condições de sazonalidade dos testemunhos;

$V$  = coeficiente de variação das resistências efetivas dos testemunhos;

$n$  = número de testemunhos ensaiados;

$k_c$  = fator de modificação do coeficiente de variação (depende de  $n$ , conforme *ACI 562, Table 6.4.3*).

Após a determinação da resistência equivalente, deve-se, então, avaliar a estrutura e verificar a segurança conforme capítulo 20 do *ACI 318-11*. Portanto, este documento do ACI não acrescenta muito ao *ACI 318-11* e ao *ACI 214.4R-10*, e apenas modifica um pouco a forma de obter a resistência equivalente (primeiro passo) do concreto em estruturas existentes, mantendo o segundo passo, e, ainda sendo aplicáveis, os terceiro e quarto passos do caso geral.

#### 4.2.3 FIB MODEL CODE FOR CONCRETE STRUCTURES 2010

Na avaliação de estruturas existentes, o *fib Model Code 2010* recomenda que valores reduzidos de  $\gamma_m$  sejam adotados quando o intuito for avaliar uma estrutu-

ra existente, de modo a levar em conta as ações reais atuantes, as dimensões efetivas e as propriedades reais dos materiais empregados na estrutura. Para o fator  $\gamma_{Rd1}$ , que representa o produto  $\gamma_{Rd1} \cdot \gamma_{Rd2}$ , equivalente ao produto do  $\gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3}$ , a norma recomenda adotar o valor de 1,0.

O fator  $\gamma_{Rd}$  expressa as incertezas no modelo de cálculo e geometria. Percebe-se claramente que, na análise de uma estrutura existente, estas incertezas são menores, permitindo reduzir este fator de 1,10 para 1,00.

Para uma análise probabilista pura, o *fib Model Code 2010* recomenda que se realize a análise baseada em índices de confiabilidade, a partir de onde se obterão novos coeficientes de segurança. A Tabela 4.2 apresenta as diferenças entre os índices de confiabilidade ( $\beta$ ) a se considerar no projeto de novas estruturas e na análise de estruturas existentes.

#### 4.2.4 EUROCODE 2. EN 1992.

*DEC. 2004. DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES. GENERAL RULES AND RULES FOR BUILDINGS [22] e EN 13791. JAN. 2007.*

*ASSESSMENT OF IN-SIT COMPRESSION STRENGTH IN STRUCTURES AND PRECAST CONCRETE COMPONENTS [23]*

De modo similar, também o *EURO-*

*CODE 2* recomenda que valores reduzidos de  $\gamma_c$  e  $\gamma_s$  sejam adotados, desde que sejam mitigadas as incertezas no cálculo da resistência.

No que tange à determinação da resistência equivalente (primeiro passo), aplica-se a *EN 13791*, que traz os modelos de cálculo expostos a seguir (adota-se, sempre, o menor dos dois valores).

#### → 15 testemunhos ou mais

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - 1,48 \cdot s \quad \text{ou} \quad f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4 \quad [6]$$

Onde:

$f_{ck, is}$  = resistência equivalente da amostra;

$f_{m(n), is}$  = média das resistências equivalentes dos testemunhos ensaiados;

$s$  = desvio padrão da amostra;

$f_{is, lowest}$  = menor valor de resistência à compressão obtido no ensaio dos testemunhos.

#### → 3 a 14 testemunhos

$$f_{ck, is} = f_{m(n), is} - k \quad \text{ou} \quad f_{ck, is} = f_{is, lowest} + 4 \quad [7]$$

► Tabela 4.2 – Índices de confiabilidade ( $\beta$ ) segundo o *fib Model Code 2010* (p. 31 e 32)

Estado limite	Modelo de verificação da segurança	Período de referência	Novas estruturas	Estruturas existentes	Comentário
Serviço (ELS)	0,75	0,75	1,50	1,20	Considera o mesmo critério de avaliação da segurança para estruturas novas e existentes
	0,75	0,75	1,50	1,20	
Último (ELU)	Método de Segurança Probabilista	50 anos	$3,1 \leq \beta \leq 4,3$	$3,1 \leq \beta \leq 3,8$	Permite reduzir a confiabilidade para estruturas existentes
	Método dos Fatores de Segurança Parciais	50 anos	$\beta = 3,8$	$3,1 \leq \beta \leq 3,8$	

► Tabela 4.3 – Fatores  $\gamma_c$  utilizados na análise de estruturas existentes (EUROCODE 2)

$\gamma_c$ original	$\gamma_c$ reduzido	Diferença (%)
1,5	1,4	7,1
1,5	1,45	3,4
1,5	1,35	11,1
1,5	1,3	15,4

Onde:

$f_{ck,ls}$  = resistência equivalente da amostra;

$f_{(min),ls}$  = média das resistências corrigidas dos testemunhos ensaiados;

k = fator que depende do número de testemunhos ensaiados (EN 13791 Table 2);

$f_{ls,lowest}$  = menor valor de resistência à compressão obtido no ensaio dos testemunhos.

A EN 13791 também recomenda corrigir as resistências dos testemunhos extraídos precedentemente ao cálculo da resistência equivalente, de maneira análoga ao ACI 214.4R-10, levando em conta relação h/d, diâmetro, sazonalidade, broqueamento, entre outros.

Caso a execução da estrutura tenha sido submetida a um rigoroso controle da qualidade, garantindo que desvios desfavoráveis nas dimensões das seções transversais se encontrem dentro dos limites da EN 1992 Table A.1, e, desde que o coeficiente de variação da resistência do concreto não seja superior a 10%,  $\gamma_c$  pode ser reduzido de 1,5 para 1,4 (segundo passo).

Ainda, se o cálculo da resistência de projeto se baseia em dados geométricos críticos (reduzidos por desvios e medidos na estrutura acabada), a recomendação é reduzir  $\gamma_c$  para 1,45. Neste mesmo caso, desde que o coeficiente de variação da resistência do concreto não seja superior a 10%, pode-se adotar  $\gamma_c = 1,35$ .

Quando a avaliação da estrutura existente for baseada em ensaios e testes “in loco” na estrutura acabada (como, por exemplo, extração de testemunhos),  $\gamma_c$  deve ainda ser reduzido pelo fator de conversão  $\eta = 0,85^1$ .

A Tabela 4.3 indica os percentuais de redução sugeridos pelo EUROCODE

2 para o coeficiente de segurança  $\gamma_c$ .

Percebe-se que, no caso do EUROCODE, o novo coeficiente de minoração da resistência do concreto para verificação da segurança em estruturas existentes, desde que baseada na extração de testemunhos, é equivalente ao da norma brasileira e igual a 1,27.

Finalizado esse segundo passo, caso a segurança não venha a ser atendida, ainda restam os terceiro e quarto passos do caso geral.

## 5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

De modo a se realizar uma análise comparativa com os diferentes códigos, apresenta-se um exemplo de uma estrutura que foi projetada com um  $f_{ck}$  de 25MPa, onde se tomou um conjunto de dados provenientes de extração de testemunhos de concreto (Tabela 5.1) e, em seguida, aplicou-se os conceitos de análise apresentados para as diferentes normas.

Da região em análise, foram retirados 8 testemunhos, quantidade que

► Tabela 5.1 – Conjunto de dados de testemunhos extraídos

n	1	2	3	4	5	6	7	8
$f_{cl,ext}$	15,4	15,4	17,6	19,1	19,5	19,9	16,6	17,6

► Tabela 5.2 – Correção segundo o ACI 214.4R-10 (resultados em MPa)

n	$f_{cl,ext}$	Fatores de correção ACI-214.4R-10 Cap.9.1				$f_c$ corrigida Cap. 9.1
		$F_{lst}$	$F_{dia}$	$F_{mo}$	$F_d$	
1	15,4	15,4	17,6	19,1	19,5	17,8
2	15,4					17,8
3	17,6					20,3
4	19,1					22,1
5	19,5	1	1	1,09	1,06	22,5
6	19,9	(V=0%)	(V=0%)	(V=2,5%)	(V=2,5%)	23,0
7	16,6					19,2
8	17,6					20,3

<sup>1</sup> SEGUNDO O PRÓPRIO EUROCODE, O VALOR RESULTANTE DE  $\eta$  NÃO DEVERIA SER INFERIOR A 1,3. PORÉM, APLICANDO ESTA REDUÇÃO AO  $\gamma_c$  DE 1,5, DARIA UM VALOR DE 1,27 PARA O NOVO  $\gamma_c$ .

► Tabela 5.3 – Valores de  $f_{c, \text{equivalente}}$  propostos pelo ACI 214.4R-10, pelo ACI 562-13 e pela EN 13791

ACI 214.4R-10		ACI 562-13	EN 13791
$f_{c, \text{eq}}$ Cap. 9.4.1	$f_{c, \text{eq}}$ Cap. 9.4.2	$f_{c, \text{eq}}$ Cap.6.4.3	$f_{ck, \text{IS}}$
Tolerance factor method	Alternate method		
15,0	15,4	17,1	14,4

NOTA: A EN 13791:2007 prevê as mesmas correções para fatores que influenciam a resistência de testemunho, como: relação h/d, diâmetro, sazonalidade, broqueamento, e outros.

atende aos mínimos recomendados das normas citadas. Para essa análise, foram utilizados testemunhos padrão com 10cm de diâmetro e relação h/d = 2. Todos os valores de  $f_c$  são expressos em MegaPascal (MPa).

#### Primeiro passo: resistência equivalente

Caso se tratasse de uma estrutura em construção, para a análise segundo o ACI 318-11 (Capítulo 5), deve-se utilizar apenas 3 resultados da região com problemas. Por razões de conservadorismo, dos oito disponíveis utilizou-se apenas os 3 de menores valores.

A partir dos resultados 15,4; 15,4 e 16,6MPa, obtém-se  $f_{c, \text{equivalente}} = 18,6$  MPa (multiplicando a média dos resultados por 1,18). Esta condição não atende os critérios da norma, portanto, há necessidade de se encontrar um novo  $f_{c, \text{equivalente}}$  para continuar a análise.

Na Tabela 5.2, apresenta-se a correção de  $f_{c, \text{ext}}$  proposta pelo ACI 214.4R-10, Capítulo 9.1. Para este exemplo prático, adotou-se um nível de confiança de 95%.

A partir dos valores corrigidos de  $f_c$ , há necessidade de encontrar o valor de  $f_{c, \text{equivalente}}$ . Este parâmetro também pode ser obtido através do ACI 562-13 e EN 13791:2007, como se expõe na Tabela 5.3.

#### Segundo passo: análise da segurança

Em seguida às correções e obtenção do  $f_{c, \text{equivalente}}$ , deve-se proceder com a análise ou verificação da segurança, conforme o Capítulo 20 do ACI 318-11 (ou Cap. 5.4 do ACI 562-13<sup>2</sup>) ou o EUROCODE 2.

Segundo o ACI 318-11, admitindo que se trata de pilares sem armadura em espiral, caberia a modificação do fator de segurança  $\phi$  de 0,65 para 0,80, ou seja, equivalente a majorar a resistência equivalente ( $f_{c, \text{eq}}$ ) obtida na Tabela 5.3 em 1,23 (e continuar utilizando  $\phi = 0,65$  na verificação de projeto).

Dessa forma, os valores de resistência a serem adotados segundo esse conceito seriam os expressos na Tabela 5.4.

Do ponto de vista do EUROCODE 2, obtido o valor de  $f_{ck, \text{IS}}$  através da EN

13791 (mesmo  $f_{c, \text{eq}}$  do ACI), deve-se então aplicar os critérios de análise de segurança, conforme já descrito. De forma análoga ao executado nas análises anteriores, na Tabela 5.5 são expostas as correções de cada um dos itens contemplados em seu Anexo A.

Verifica-se, numa análise global e tomando como referência este exemplo, que a resistência final de cálculo variou de 16MPa a 21MPa, segundo o critério que se adote, como se apresenta na Tabela 5.6.

Essa variabilidade demonstra, uma vez mais, a necessidade de sempre utilizar o bom senso na tomada de decisões e de buscar considerar o problema com uma visão holística que vise abarcar todas as variáveis, sem se prender exageradamente a um número obtido matematicamente que, sabe-se e foi demonstrado, pode ter significado relativo e não absoluto.

Na análise de segurança, verifica-se que todas as normas consultadas, sem exceções, permitem grandes reduções em seus coeficientes parciais, uma vez que as variáveis após uma estrutura estar pronta são passíveis de serem medidas e consideradas no cálculo como valores efetivos. Dessa forma, como não há mais tantos desconhecimentos e incertezas, pode-se trabalhar com

► Tabela 5.4 – Valores da resistência equivalente do concreto para verificação da segurança, segundo o ACI 318-11

ACI 318-11 Cap.20		
ACI-214.4R-10		ACI-562-13
$f_{c, \text{ext}}$ Cap. 9.4.1	$f_{c, \text{eq}}$ Cap. 9.4.2	$f_{c, \text{eq}}$ Cap.6.4.3
Tolerance factor method	Alternate method	
18,4	19,0	21,0

► Tabela 5.5 – Valores de  $f_{ck}$  para verificação da segurança, segundo a EN 13791:2007 (partindo de  $\gamma_c = 1,5$ )

EN 1992-1-1 EUROCODE 2		
$f_{ck, \text{IS}}$ EN 13791	A.2.2 (2) $\gamma_{c, \text{Red3}} = 1,35$	A.2.3 (1) $\gamma_{c, \text{Red4}} = 1,19$
14,4	16,0 <sup>a</sup>	18,8 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Os valores apresentados estão majorados, considerando que em A.2.2 (2)  $f_{ck} = f_{c, \text{ext}} \cdot (\gamma_c / \gamma_{c, \text{Red2}})$  e em A.2.3 (1)  $f_{ck} = f_{c, \text{ext}} \cdot (\gamma_c / \gamma_{c, \text{Red4}})$ .

► Tabela 5.6 – Valores da resistência do concreto a serem adotados na verificação da segurança (MPa)

ACI 318-11	ACI 214.4R-10		ACI 562-13	EN 1992-1-1 EUROCODE 2	
	Tolerance factor method	Alternate method		A.2.2 (2) $\gamma_{c,Red3} = 1,35$	A.2.3 (1) $\gamma_{c,Part} = 1,19$
18,6	18,4	19,0	21,0	16,0	18,8

uma margem de segurança menor e mais racional.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No universo da normalização existente foi possível verificar diferentes critérios de análise, entretanto todas as normas analisadas têm em comum o fato de que a redução de algumas parcelas dos coeficientes parciais é plenamente viável, sem prejuízo da segurança estrutural.

Entretanto, para lançar mão de novos coeficientes, faz-se necessário ter um conhecimento maior da estrutura e, nesse aspecto, entra a importante atividade de inspeção, na qual o rigor da execução e os parâmetros geométricos e de qualidade dos materiais devem ser adequadamente verificados.

O *fib Model Code 2010*, na composição do coeficiente de minoração da resistência do material, considera, de forma explícita, além da parcela relativa ao desconhecimento da resistência do material, a parcela que leva em conta as incertezas geométricas que podem eventualmente ocorrer durante a execução. Nesse aspecto, ao se constatar que a estrutura foi executada com geometria dentro de padrões considerados aceitáveis e, tendo conhecimento da resistência do concreto na estrutura

(através de testemunhos), poder-se-ia efetuar a redução do  $\gamma_m$ .

Na norma norte-americana, no tocante à resistência do concreto, fica evidente a separação da análise do material e análise de segurança, sendo o primeiro item especificado pelo ACI 214.4R-10 ou pelo ACI 562-13, que tratam de corrigir variáveis inerentes a ensaio e a propriedades intrínsecas do concreto, enquanto a segurança é tratada de acordo com o Capítulo 20 do ACI 318-11.

O EUROCODE 2 atua de forma análoga ao *fib Model Code 2010*, permitindo a redução dos coeficientes  $\gamma_c$ , desde que a geometria da estrutura tenha sido executada de forma rigorosa e tais medidas sejam consideradas no cálculo (característica medida por um controle efetivo da qualidade na construção).


Sobre as considerações referentes à influência da idade e das cargas de longa duração na avaliação da resistência do concreto, estes pesquisadores não encontraram, na bibliografia disponível, nenhuma menção à necessidade de retroagir a resistência do concreto a 28 dias. Nenhum texto foi encontrado considerando o crescimento ou o decréscimo da resistência do concreto após 28 dias, quando analisado em estruturas existentes e com idades muito ou pouco superiores a 28 dias.

Uma recomendação de ordem prática dos autores seria considerar, na verificação do projeto, a resistência obtida na idade de ensaio, sem qualquer regressão, e proceder com os cálculos conforme a teoria normalizada.

De forma geral e com visão holística, constatou-se nesse artigo que a verificação da segurança de uma estrutura existente é uma análise complexa e diferenciada, que depende do conhecimento profundo da estrutura e da tecnologia do concreto, assim como dos conceitos de segurança.

Em suma, é necessário que o profissional de engenharia responsável pela análise da estrutura existente conheça as variáveis envolvidas no processo e saiba desprezar aquelas que já atuaram, garantindo uma avaliação confiável e que resulte em decisões seguras e econômicas.

Além disso, para garantir o desempenho estrutural, deve ser frequentemente realizado o monitoramento das edificações, bem como as inspeções e manutenções necessárias e periódicas.

Para obras novas, a racionalização da construção, o Controle de Qualidade de Projeto (CQP) e o Controle Tecnológico (CT) das obras devem ser incentivados e realizados, de modo a obter obras seguras, dentro das condições projetadas e das regras de bem construir. 

## ► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- [19] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318-11: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills: ACI, 2011.
- [20] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 214.4R-10: Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results. Farmington Hills: ACI, 2010.
- [21] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 562-13: Code Requirements for Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Building and Commentary. Farmington Hills: ACI, 2013.
- [22] COMITE EUROPÉEN DE NORMALISATION. EUROCODE 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.
- [23] COMITE EUROPÉEN DE NORMALISATION. EN 13791: Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components. Brussels: CEN, 2007.