



**edificação
SEGURA**
PROGRAMA NACIONAL
DE REDUÇÃO DE RISCOS
E AUMENTO DA VIDA ÚTIL
DE ESTRUTURAS DE
EDIFICAÇÕES





Curso de capacitação em inspeção de estruturas de concreto - 2014 -

Módulo 3. Mecanismos de deterioração, manifestações patológicas em estruturas de concreto e medidas preventivas

Prof. Paulo Helene. PhD Engenharia

Patrocínio:







Coordenação:



1







Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto



"O Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras"

Paulo Helene
*Diretor PhD Engenharia
Presidente de Honor ALCONPAT
Prof. Titular Universidade de São Paulo USP
Member fib(CEB-FIP) Service Life of Concrete Structures
Diretor e Conselheiro Permanente Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON*

Centro Britânico16 de Junho de 2014São Paulo

2

Definições

ABNT NBR 6118:2007 item 8.1:

E_{ci} → módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial do concreto, referindo-se sempre ao módulo cordal a 30% f_c ;

E_{cs} → módulo de elasticidade secante do concreto, também denominado módulo de deformação secante do concreto;

$E_{ci}(t_0)$ → módulo de elasticidade ou módulo de deformação inicial do concreto no instante t_0 ;

E_{ci28} → módulo de elasticidade ou módulo de deformação inicial do concreto aos 28 dias.

ABNT NBR 6118:2014 item 8.2.8:

o módulo de elasticidade (E_{ci}) deve ser obtido segundo o método de ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522, sendo considerado nesta norma o módulo de deformação tangente inicial, obtido aos 28 dias de idade;

o módulo de deformação secante pode ser obtido segundo método de ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522, ou estimado pela expressão:

$$E_{cs} = E_{ci} * (0,8 + 0,2 * f_{ck}/80) \leq 1,0;$$

$E_{ci}(t_0)$ → módulo de elasticidade ou módulo de deformação inicial do concreto no instante t_0 ;

E_{ci28} → módulo de elasticidade ou módulo de deformação inicial do concreto aos 28 dias.



3

Definições

EUROCODE 2 item 1.6:

E_c → tangent modulus of elasticity of normal weight concrete at a stress of $\sigma_c = 0$;

$E_{c,eff}$ → effective modulus of elasticity of concrete (item 7.4.3);

E_{cd} → design value of modulus of elasticity of concrete;

E_{cm} → secant modulus of elasticity of concrete between $\sigma_c = 0$ and $0,4f_{cm}$;

$E_c(t)$ → tangent modulus of elasticity of normal weight concrete at a stress of $\sigma_c = 0$ and at time t .

fib Model Code 2010 – Notations:

E_c → modulus of elasticity for concrete;

$E_{ci}(t_0)$ → tangent modulus of elasticity of concrete at the time of loading t_0 ;

E_{ci} → tangent modulus of elasticity of concrete at an age of 28 days;

$E_{ci}(t)$ → modulus of elasticity of concrete at an age $t \neq 28$ days;

$E_{c,1}$ → secant modulus from the origin to the peak compressive stress (Table 5.1-8);

$E_{c,imp}$ → modulus of elasticity of concrete for impact loading (item 5.1.11.2.4).

ACI 318-14 item 2.2:

E_c → modulus of elasticity of concrete;

E_{cb} → modulus of elasticity of beam concrete;

E_{cs} → modulus of elasticity of slab concrete.



4

Fatores intervenientes



A. Diretos

1. Relação água/cimento: (*inverso*)
2. Natureza do agregado: (*direto*)
Basalto, diabásio, granito, gnaiss, calcário, arenito, meta-sedimento
3. Teor de argamassa seca: (*inverso*)
 $(1+a)/(1+m)$
4. Fração pasta: (*inverso*)
 $(1+a/c)/(1+m+a/c)$
5. Fração agregado: (*direto*)
 $(1+a+p)/(1+m)$
6. Adições: (*inverso*)
7. Umidade do corpo de prova (*inverso*)
8. Teor de ar incorporado ou aprisionado: (*inverso*)

Indiretos:

1. Resistência à compressão (*direto*)
2. Consistência (slump) (*inverso*)

5

Como ensaiar?



Ensaio Estático

ABNT NBR 8522:2008

Item 3.5 Módulo de deformação secante (E_{cs}): Propriedade do concreto cujo valor numérico é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação específica, passando pelos pontos A e B correspondentes, respectivamente, à tensão σ_a e à tensão considerada no ensaio;

Item 3.6 Módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}): módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial, que é considerado **equivalente** ao módulo de deformação **secante** ou cordal entre σ_a e $30\%f_c$, para o carregamento estabelecido neste método de ensaio;

6

Como ensaiar?



7

Como estimar?

| NORMA | MÓDULO TANGENTE | MÓDULO SECANTE |
|-----------------------------|---|---|
| ABNT NBR 6118:2007 | $E_{ci} = 5600 * \sqrt{f_{ck}}$ | $E_{cs} = 0,85 * E_{ci}$ |
| ABNT NBR 6118:2014* | $E_{ci} = \alpha_E * 5600 * \sqrt{f_{ck}}$ para f_{ck} de 20MPa a 50MPa $E_{ci} = 21,5 * 10^3 * \alpha_E * \left(\frac{f_{ck} + 1,25}{10}\right)^{1/3}$ para f_{ck} de 55MPa a 90MPa | $E_{cs} = \alpha_i * E_{ci}$ $E_{cs} = \left[0,8 + 0,2 * \left(\frac{f_{ck}}{80}\right)\right] * E_{ci}$ |
| <i>fib</i> MODEL CODE 2010* | $E_{ci} = 21,5 * 10^3 * \alpha_E * \left(\frac{f_{ck} + 8}{10}\right)^{1/3}$ $E_{ci}(t) = \left(e^{\left\{s * \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0,5}\right]\right\}}\right)^{0,5} * E_{ci}$ | $E_c = \alpha_i * E_{ci}$ $E_c = \left[0,8 + 0,2 * \left(\frac{f_{cm}}{88}\right)\right] * E_{ci}$ |

* $\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio; $1,0$ para granito e gnaisse; $0,9$ para calcário e $0,7$ para arenito.

8

Como estimar?

| NORMA | MÓDULO TANGENTE | MÓDULO SECANTE |
|---------------------|---|---|
| ABNT NBR 6118:2007 | $E_{ci} = 5600 * \sqrt{f_{ck}}$ | $E_{cs} = 0,85 * E_{ci}$ |
| ABNT NBR 6118:2014* | $E_{ci} = \alpha_E * 5600 * \sqrt{f_{ck}}$ para f_{ck} de 20MPa a 50MPa $E_{ci} = 21,5 * 10^3 * \alpha_E * \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1/3}$ para f_{ck} de 55MPa a 90MPa | $E_{cs} = \alpha_i * E_{ci}$ $E_{cs} = \left[0,8 + 0,2 * \left(\frac{f_{ck}}{80}\right)\right] * E_{ci}$ |
| ACI 318 -14** | - | $E_c = 0,043 * \omega_c^{1,5} * f_c'^{1/2}$ (MPa) para ω_c entre 1440 e 2560 kg/m ³ $E_c = 4732 * f_c'^{1/2}$ (MPa) para concreto de massa específica normal |
| EUROCODE 2 | $E_c = 1,05 * E_{cm}$ $E_{c(t)} = 1,05 * \left(e^{\left\{ s * \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0,5} \right] \right\}} \right)^{0,3} * E_{cm}$ | $E_{cm} = 22 * \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$ (f_{cm} em MPa) $E_{cd} = E_{cm}/1,2$ |

* $\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio; 1,0 para granito e gnaíse; 0,9 para calcário e 0,7 para arenito.

**o item R19.2.2.1 traz a definição de E_c como a inclinação da reta traçada a partir da origem até a tensão de compressão de $0,45 * f_c'$ e que os valores de módulo de elasticidade obtidos através de ensaios podem variar de 80% a 120% dos valores previstos.

9

Como estimar?

Empregando as expressões da ABNT NBR 6118:2014, pode-se considerar os valores arredondados da Tabela 8.1.

Tabela 8.1 - Valores estimados de módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto (considerando o uso de granito como agregado graúdo)

| Classe de resistência | C20 | C25 | C30 | C35 | C40 | C45 | C50 | C60 | C70 | C80 | C90 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| E_{ci} (GPa) | 25 | 28 | 31 | 33 | 35 | 38 | 40 | 42 | 43 | 45 | 47 |
| E_{cs} (GPa) | 21 | 24 | 27 | 29 | 32 | 34 | 37 | 40 | 42 | 45 | 47 |
| α_i | 0,85 | 0,86 | 0,88 | 0,89 | 0,90 | 0,91 | 0,93 | 0,95 | 0,98 | 1,00 | 1,00 |

10

Como controlar?



De acordo com Montija (2007), as variabilidades dentro do ensaio estático, aferidas em programas interlaboratoriais nacionais, podem promover desvios padrões da ordem de 3,5GPa.

Dados atualizados destes mesmos interlaboratoriais, de acordo com os resultados apresentados por Bittencourt et al. (2014), mostram que estes desvios são de 5,8GPa a 6,3GPa, o que significa uma variabilidade expressa pelo coeficiente de variação da ordem de 10% a 15%, que é equivalente à variabilidade da resistência de um concreto na condição de preparo do grupo B (concreto produzido no canteiro segundo ABNT NBR 12655:2006).

Por desconhecimento dessa natural e elevada variabilidade dos resultados, também constatada pelo ACI 318 que recomenda tolerância de 0,8 a 1,2 do resultado previsto pelo modelo matemático, infelizmente tem havido discussões e desgastes desnecessários entre fornecedores, construtores e projetistas.

11

ASPECTOS CONTROVERSOS

12

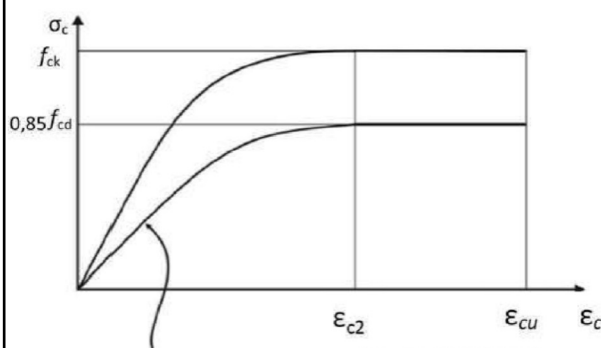
Comparação entre os modelos de previsão dos módulos de elasticidade

| f_{ck} [MPa] | Módulo [GPa] | | | | | | | |
|-------------------|---------------|---------|---------------------|---------|--------------|---------------|---------|---------|
| | NBR 6118:2014 | | fib Model Code 2010 | | ACI 318:2011 | Eurocode:2004 | | |
| | tangente | secante | tangente | secante | secante | tangente | secante | cálculo |
| 20 | 25,0 | 21,3 | 30,3 | 26,2 | 21,2 | 31,5 | 30,0 | 25,0 |
| 40 | 35,4 | 31,9 | 36,3 | 33,0 | 29,9 | 37,0 | 35,2 | 29,4 |
| 60 | 41,6 | 39,5 | 40,7 | 38,9 | 36,7 | 41,1 | 39,1 | 32,6 |
| 90 | 46,7 | 46,7 | 46,0 | 46,0 | 44,9 | 45,8 | 43,6 | 36,4 |

13

ABNT NBR 6118:2014

item 8.2.10 Diagrama tensão-deformação



- Para concretos de classe até C50:

$$\epsilon_{c2} = 2,0\text{‰};$$

$$\epsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$$

- Para concretos de classes C55 até C90:

$$\epsilon_{c2} = 2,0\text{‰} + 0,085\text{‰} \cdot (f_{ck} - 50)^{0,53};$$

$$\epsilon_{cu} = 2,6\text{‰} + 35\text{‰} \cdot [(90 - f_{ck})/100]^4;$$

$$\sigma_c = 0,85 f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^n \right]$$

Para $f_{ck} \leq 50$ MPa: $n=2$
 Para $f_{ck} > 50$ MPa: $n = 1,4 + 23,4 [(90 - f_{ck})/100]^4$

Figura 8.2 - Diagrama tensão-deformação idealizado

14

Qual ponto adotar?

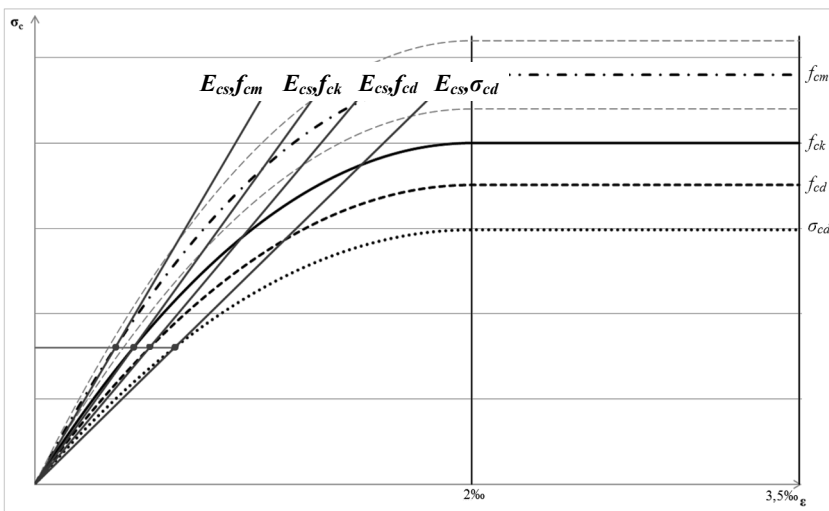
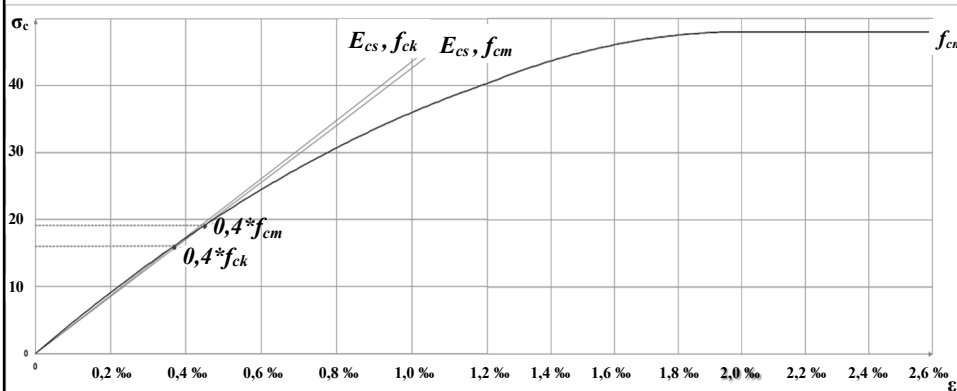


Diagrama tensão-deformação específica idealizado, adaptado da ABNT NBR 6118:2014, Figura 8.2

15

Qual ponto adotar?



Determinação do módulo secante, segundo a ABNT NBR 6118:2014 e EUROCODE, para um concreto genérico de $f_{ck}=40\text{MPa}$

16

Onde influencia?

Fluência

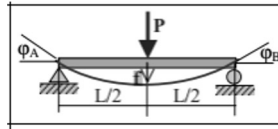
$$\varepsilon_c = \sigma_c(t_0) \left[\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c28}} \right] + \varepsilon_{cs}(t, t_0) + \Delta\sigma_c(t, t_0) \left(\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{c28}} \right)$$

Parâmetro de instabilidade

$$\alpha = H_{tot} \sqrt{N_k / (E_{cs} I_c)}$$

Flecha

Ex.: Viga bi-apoiada com carga concentrada

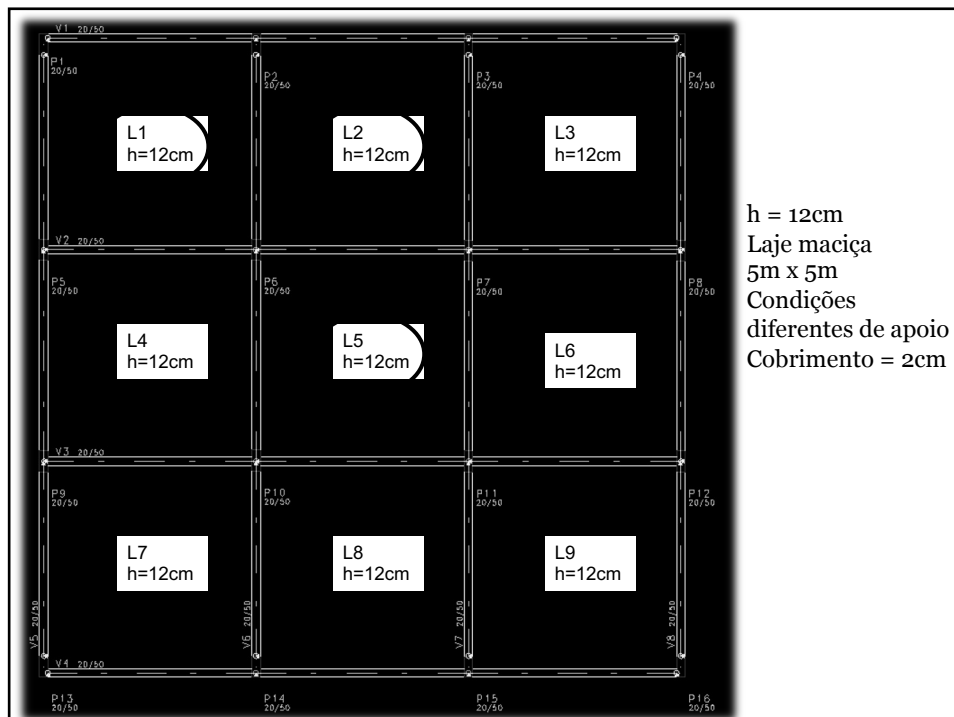


$$f = - \frac{PL^3}{48EI}$$

Não linearidade física

- lajes: $(E)_{sec} = 0,3 E_{ci} / c$
- vigas: $(E)_{sec} = 0,4 E_{ci} / c$ para $A_s' \neq A_s$ e
 $(E)_{sec} = 0,5 E_{ci} / c$ para $A_s' = A_s$
- pilares: $(E)_{sec} = 0,8 E_{ci} / c$

17



h = 12cm
 Laje maciça
 5m x 5m
 Condições
 diferentes de apoio
 Cobrimento = 2cm

18

Quanto influencia? $f_{ck} = 20\text{MPa}$

| C20 | Imediata (cm) | | | Diferida (cm) | | |
|------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| | L1 | L2 | L5 | L1 | L2 | L5 |
| -20% | -0,70 | -0,40 | -0,20 | -1,37 | -0,98 | -0,31 |
| -15% | -0,60 | -0,40 | -0,20 | -1,29 | -0,92 | -0,29 |
| -10% | -0,60 | -0,40 | -0,20 | -1,21 | -0,87 | -0,28 |
| -5% | -0,60 | -0,30 | -0,20 | -1,15 | -0,82 | -0,26 |
| 0 | -0,50 | -0,30 | -0,20 | -1,09 | -0,78 | -0,25 |
| 5% | -0,50 | -0,30 | -0,20 | -1,04 | -0,75 | -0,24 |
| 10% | -0,50 | -0,30 | -0,10 | -0,99 | -0,71 | -0,23 |
| 15% | -0,50 | -0,30 | -0,10 | -0,95 | -0,68 | -0,22 |
| 20% | -0,40 | -0,30 | -0,10 | -0,91 | -0,65 | -0,21 |

$h = 12\text{cm} = \text{cte}$
 $f_{ck} = \text{cte}$
 Cobrimento = cte
 $E_{cs} = \text{variável}$
 Taxa armadura cte
 $t_x = 0,15\%$
 $t_y = 0,15\%$

19

Quanto influencia? $f_{ck} = 35\text{MPa}$

| C35 | Imediata (cm) | | | Diferida (cm) | | |
|------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| | L1 | L2 | L5 | L1 | L2 | L5 |
| -20% | -0,50 | -0,30 | -0,10 | -0,93 | -0,60 | -0,33 |
| -15% | -0,50 | -0,30 | -0,10 | -0,88 | -0,57 | -0,31 |
| -10% | -0,40 | -0,30 | -0,10 | -0,83 | -0,54 | -0,30 |
| -5% | -0,40 | -0,30 | -0,10 | -0,79 | -0,51 | -0,28 |
| 0 | -0,40 | -0,20 | -0,10 | -0,75 | -0,48 | -0,27 |
| 5% | -0,40 | -0,20 | -0,10 | -0,71 | -0,46 | -0,25 |
| 10% | -0,40 | -0,20 | -0,10 | -0,68 | -0,44 | -0,24 |
| 15% | -0,30 | -0,20 | -0,10 | -0,65 | -0,42 | -0,23 |
| 20% | -0,30 | -0,20 | -0,10 | -0,62 | -0,40 | -0,22 |

$h = \text{cte}$
 $f_{ck} = \text{cte}$
 Cobrimento = cte
 $E_{cs} = \text{variável}$
 Taxa armadura cte
 $t_x = 0,17\%$
 $t_y = 0,20\%$

20

Quanto influencia? $f_{ck} = 50\text{MPa}$

| C50 | Imediata (cm) | | | Diferida (cm) | | |
|------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| | L1 | L2 | L5 | L1 | L2 | L5 |
| -20% | -0,40 | -0,20 | -0,10 | -0,78 | -0,51 | -0,28 |
| -15% | -0,30 | -0,20 | -0,10 | -0,74 | -0,48 | -0,26 |
| -10% | -0,30 | -0,20 | -0,10 | -0,70 | -0,45 | -0,25 |
| -5% | -0,30 | -0,20 | -0,10 | -0,66 | -0,43 | -0,23 |
| 0 | -0,30 | -0,20 | -0,10 | -0,63 | -0,41 | -0,22 |
| 5% | -0,30 | -0,20 | -0,10 | -0,60 | -0,39 | -0,21 |
| 10% | -0,30 | -0,20 | -0,10 | -0,57 | -0,37 | -0,20 |
| 15% | -0,30 | -0,20 | -0,10 | -0,55 | -0,35 | -0,19 |
| 20% | -0,20 | -0,10 | -0,10 | -0,52 | -0,34 | -0,19 |

$h = \text{cte}$
 $f_{ck} = \text{cte}$
 Cobrimento = cte
 $E_{cs} = \text{variável}$
 Taxa armadura cte
 $t_x = 0,20\%$
 $t_y = 0,24\%$

21

17.3.5.2.1 Armadura de tração

A armadura mínima de tração, em elementos estruturais armados ou protendidos deve ser determinada pelo dimensionamento da seção a um momento fletor mínimo dado pela expressão a seguir, respeitada a taxa mínima absoluta de 0,15 %:

$$M_{d,\text{mín}} = 0,8W_0 f_{ctk,\text{sup}}$$

onde

W_0 é o módulo de resistência da seção transversal bruta de concreto, relativo à fibra mais tracionada;

$f_{ctk,\text{sup}}$ é a resistência característica superior do concreto à tração (ver 8.2.5).

Alternativamente, a armadura mínima pode ser considerada atendida se forem respeitadas as taxas mínimas de armadura da Tabela 17.3.

Tabela 17.3 – Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas

| Forma da seção | Valores de $\rho_{\text{mín}}^a$ ($A_{s,\text{mín}}/A_c$) % | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 |
| Retangular | 0,150 | 0,150 | 0,150 | 0,164 | 0,179 | 0,194 | 0,208 | 0,211 | 0,219 | 0,226 | 0,233 | 0,239 | 0,245 | 0,251 | 0,256 |

^a Os valores de $\rho_{\text{mín}}$ estabelecidos nesta Tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $d/h = 0,8$ e $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, $\rho_{\text{mín}}$ deve ser recalculado.

22

Bibliografia



HELENE, Paulo et al. Considerações sobre o Módulo de Elasticidade do Concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56., 2014, Natal. No Prelo, 2014. (download free www.concretophd.com.br/publicacao.asp?codigo=17)

MONTEIRO, Paulo J. M., HELENE, Paulo & KANG, S. Designing Concrete Mixtures for Strength, Elastic Modulus and Fracture Energy. Materials & Structures, v.26, p.443 - 452, 1993. (download free www.concretophd.com.br/publicacao.asp?codigo=17)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto. Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. (consulta free na biblioteca da PhD)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8522. Determinação do módulo elástico de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008. (consulta free na biblioteca da PhD)

BITTENCOURT, R. M.; FARIAS, L. A.; INÁCIO, J. J.; MARQUES, R. A. Relatório do XIX Programa Interlaboratorial de Ensaio de Concreto/2013, Furnas Centrais Elétricas S.A., à Comissão Técnica de Laboratórios de Ensaio em Construção Civil do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO-CTLE-01), Goiânia, 2014. (consulta free na biblioteca da PhD)

CABRAL, Larissa Marques Cunha. Análise comparativa do módulo de elasticidade calculado segundo diferentes normas. 2014. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia das Construções, Departamento de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2014. (download free www.concretophd.com.br/publicacao.asp?codigo=20)

23

OBRIGADO!



"do Laboratório de Pesquisa ao Canteiro de Obras"

www.concretophd.com.br
www.phd.eng.br

11-2501-4822 / 23
11-7881-4014

24