



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica

Dimensionamento de elementos estruturais de CRF de acordo com o *fib* Model Code 2010

Prof. Luís A. G. Bitencourt Jr.

São Paulo
11/10/2019

Aplicações estruturais

25 kg/m^3
de fibras de aço



redução da armadura
convencional em **55%**

Linha 9 do metrô
Barcelona, Espanha

Parque Oceanográfico
Valencia, Espanha

RC-SFRC
 50 kg/m^3 +
única camada
de tela de aço



Casca com
espessura de **6 cm**



**fibras de aço +
armadura convencional +
concreto autoadensável**

bombeado desde o nível
do solo até uma altura
de 240 metros

CCTV (China Central Television
Building) Headquarters
Beijing, China

Maison de l'Écriture
Montricher, Suíça

RC-SFRC
 20 kg/m^3

redução da
armadura mínima

auxílio em regiões
difíceis de execução

Centro Ovale
Chiasso, Suíça

30 kg/m^3



controle de
fissuração
(região pós-
tensionada)



melhorar a
ductilidade
(região de
ligação com o
subsolo)



Linha 4 (Linha amarela) do metrô
São Paulo, Brasil

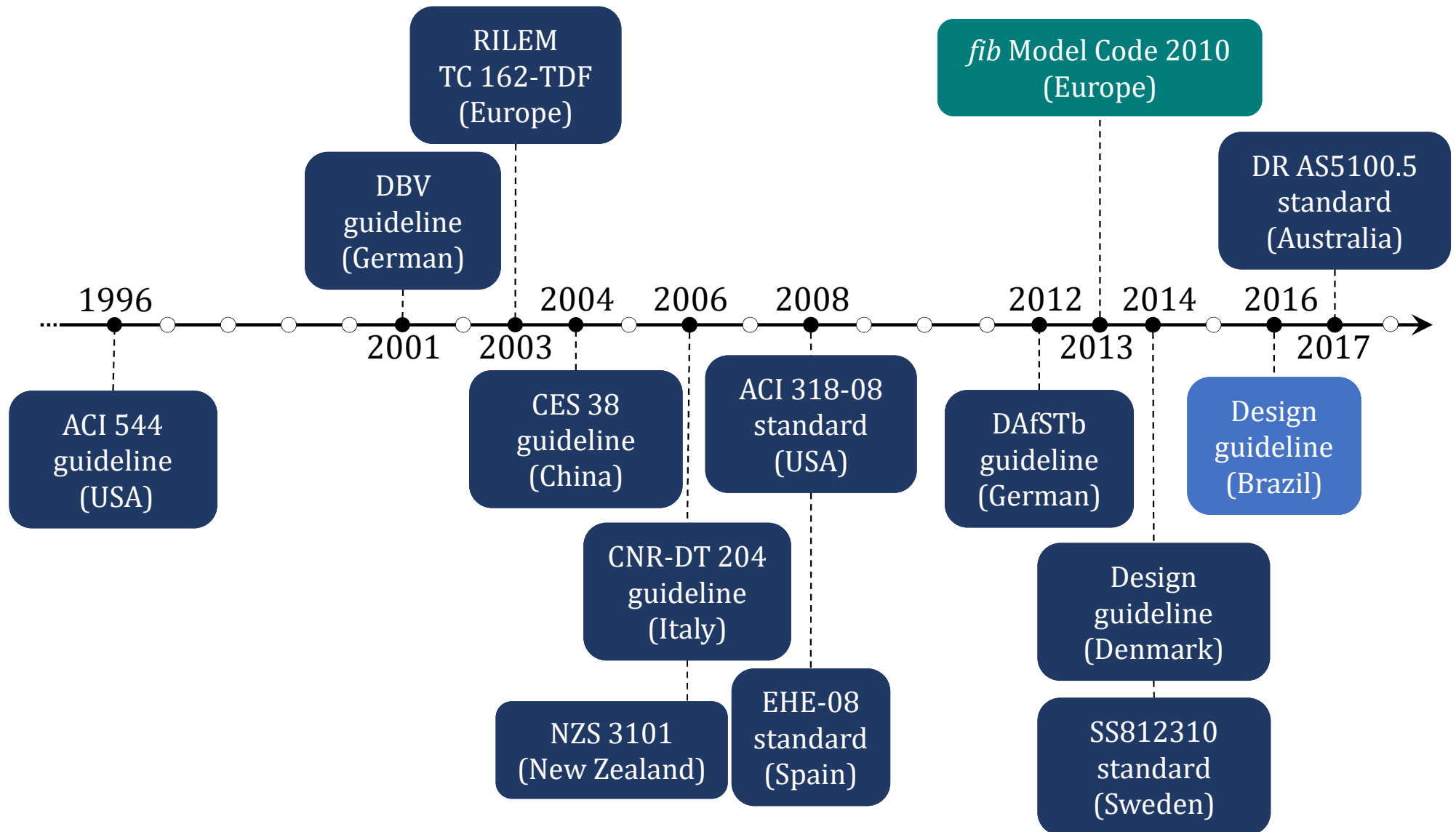
40 kg/m^3



fibras de aço como reforço nas
aduelas



Normas e Recomendações para o dimensionamento do CRF





Dimensionamento do CRF

Ensaio de
caracterização
(comportamento à tração)



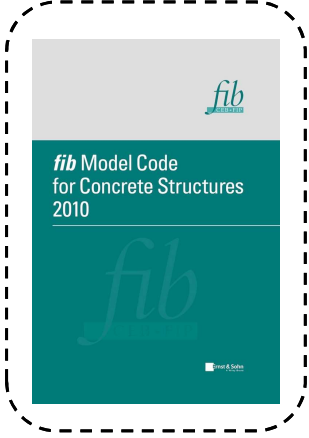
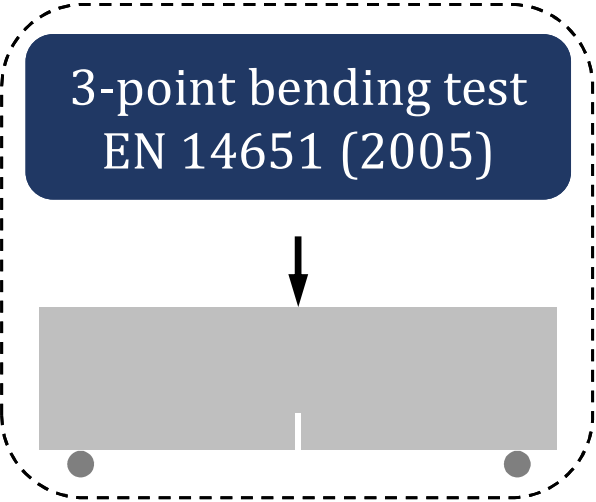
Parâmetros
do CRF



Modelos
constitutivos



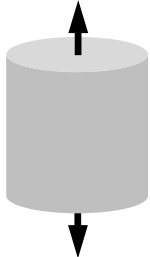
Métodos de
dimensionamento
do CRF



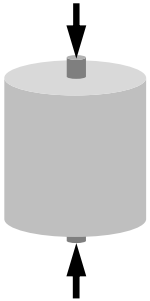


Ensaio para caracterização do CRFA

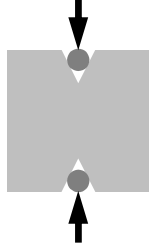
Uniaxial tensile test



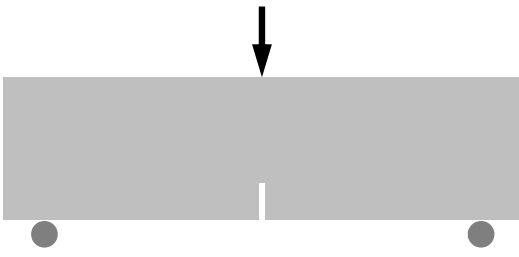
Double punching test (Barcelona test)



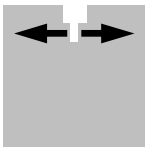
Double-edge wedge-splitting test (DEWS)



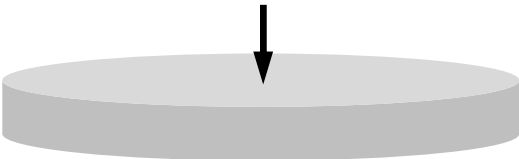
3-point bending test



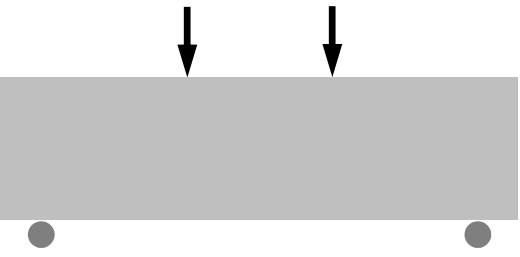
Wedge-splitting test (WST)



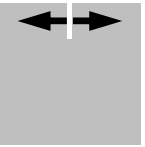
Round determinate panel test (RDP)



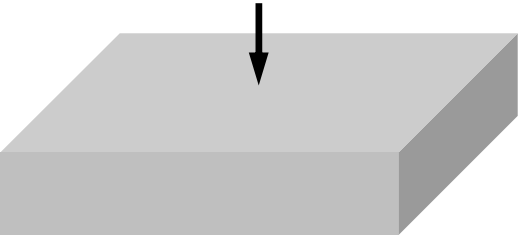
4-point bending test



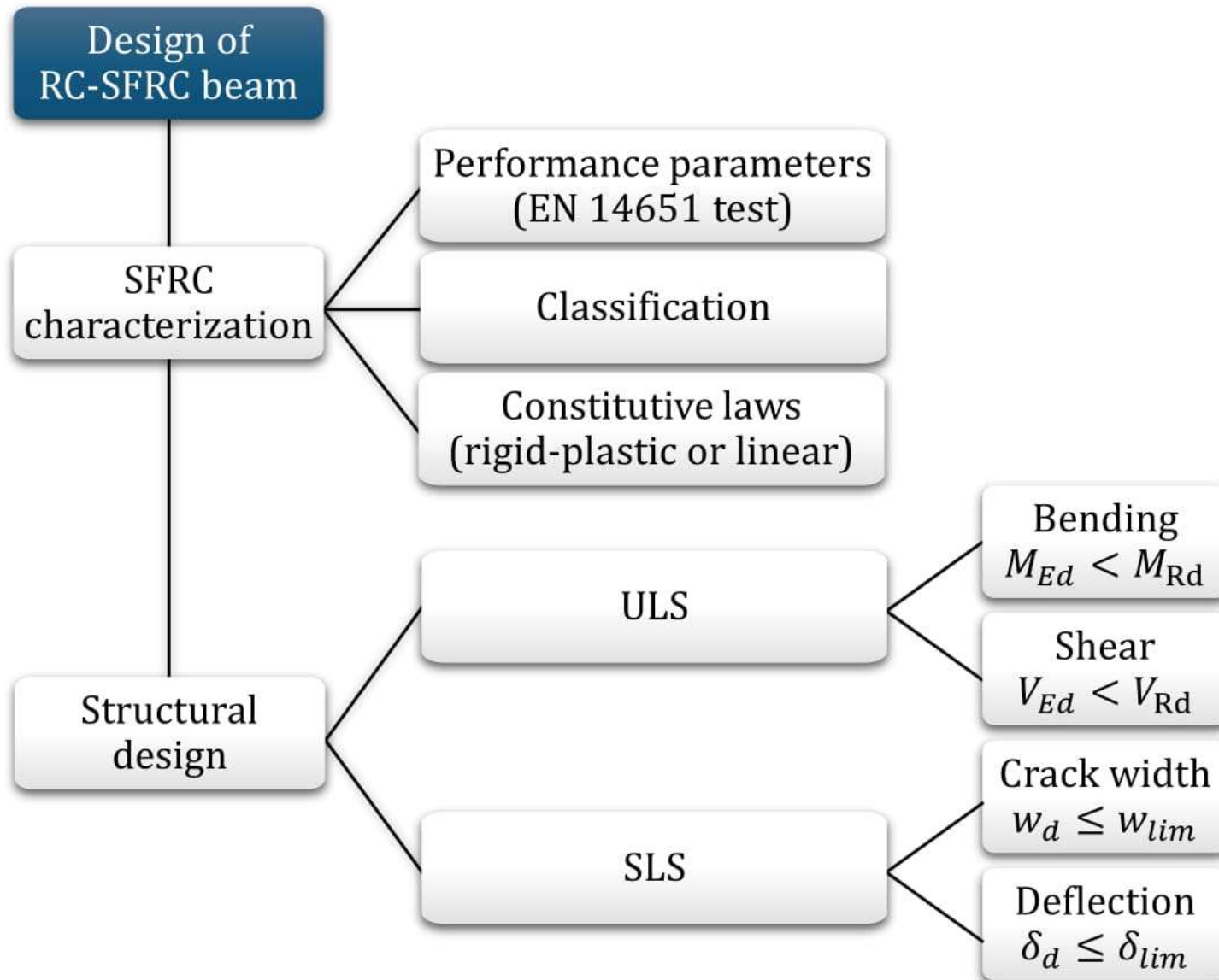
Montevideo test (MVD)



EFNARC panel test

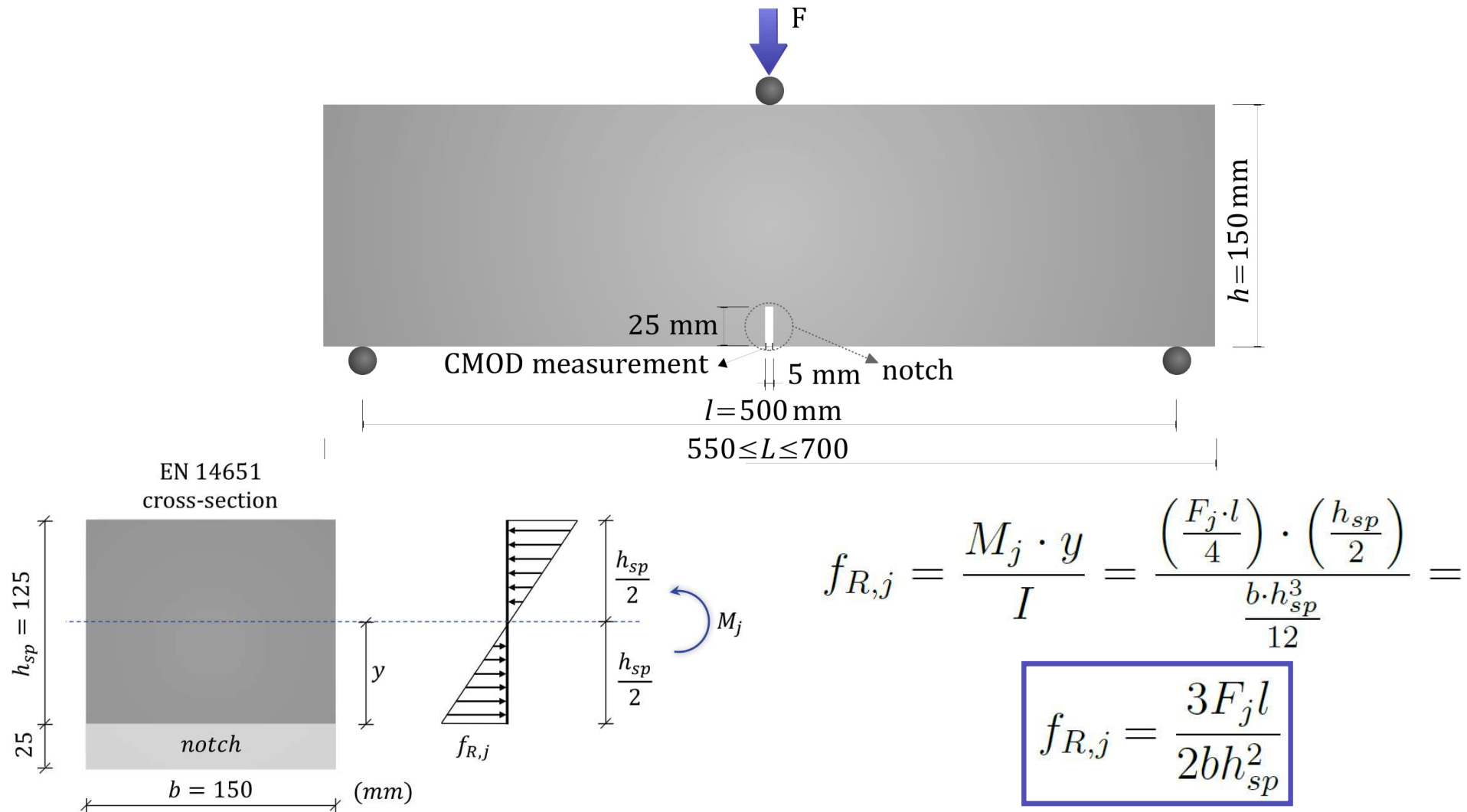


Dimensionamento de elementos de RC-SFRC de acordo com o MC2010



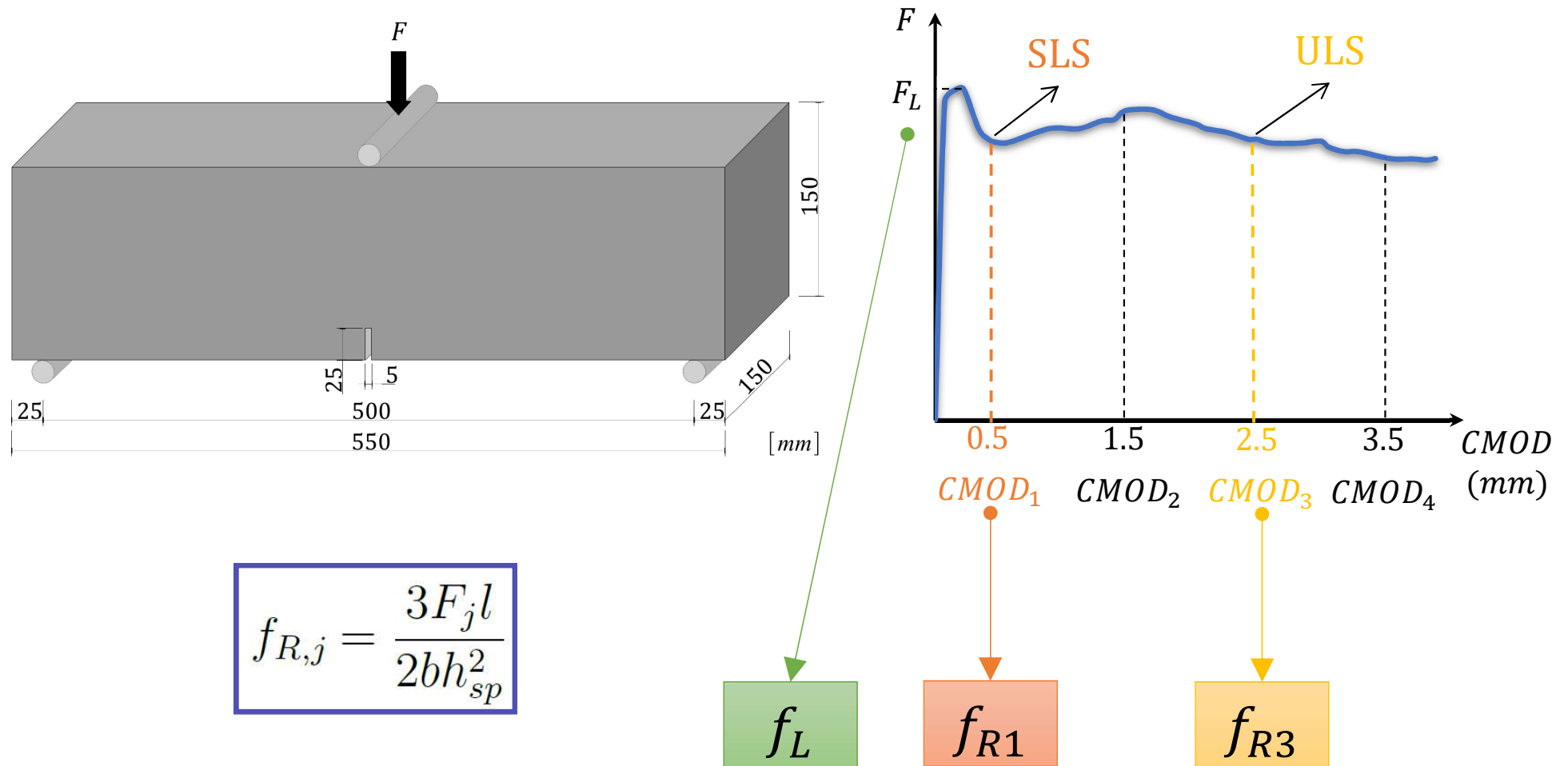
Caracterização do CRF

Parâmetros de desempenho baseados no EN 14651



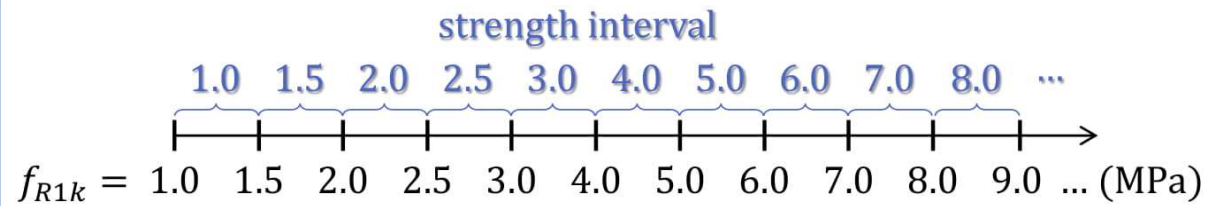
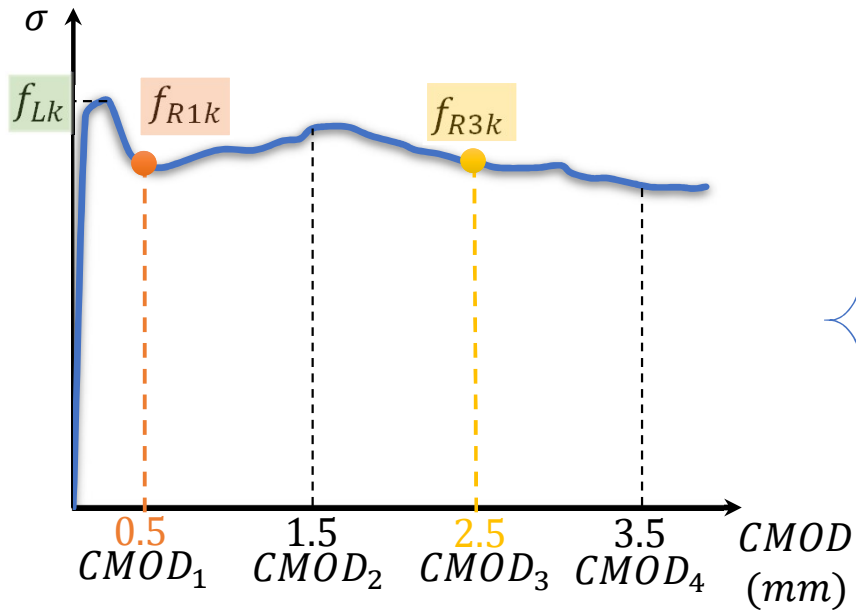
Caracterização do CRF

Parâmetros de desempenho baseados no EN 14651



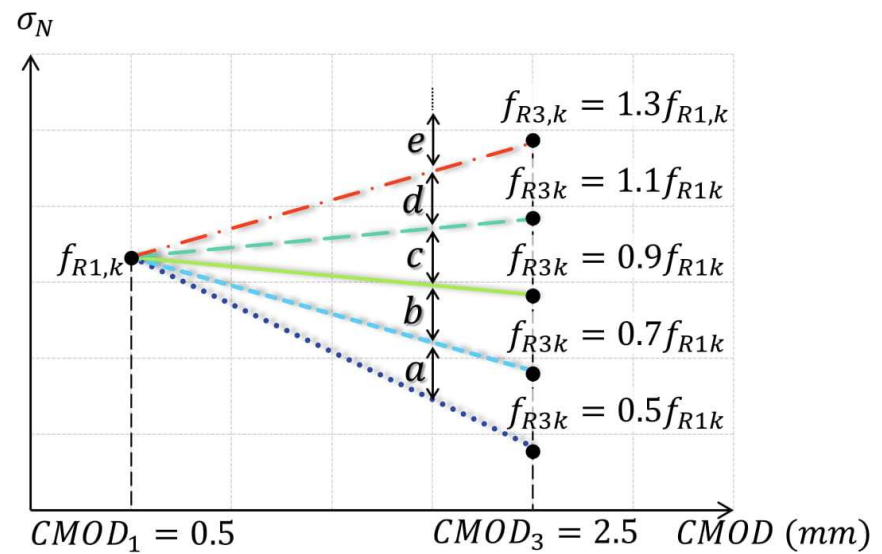
Caracterização do CRF

Classificação



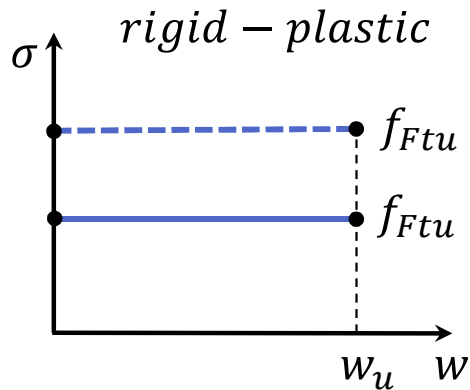
Example: 3b

- interval resistance
 $f_{R1k} : 3 - 4 MPa$
- $f_{R3k}/f_{R1k} : 0.7 - 0.9$



Leis constitutivas para o comportamento à tração (pós-fissuração)

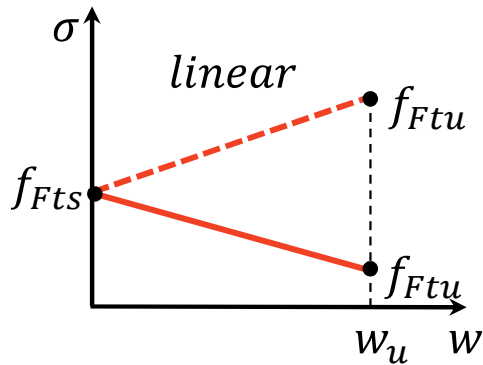
Modelo rígido-plástico



$$f_{Ftu} = \frac{f_{R3}}{3}$$

--- hardening
— softening

Modelo linear

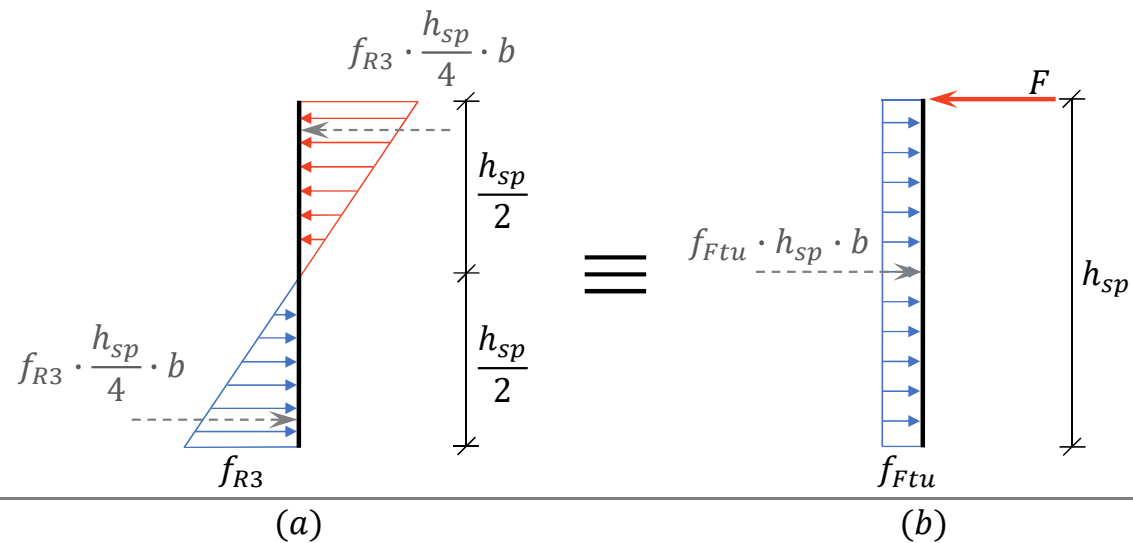
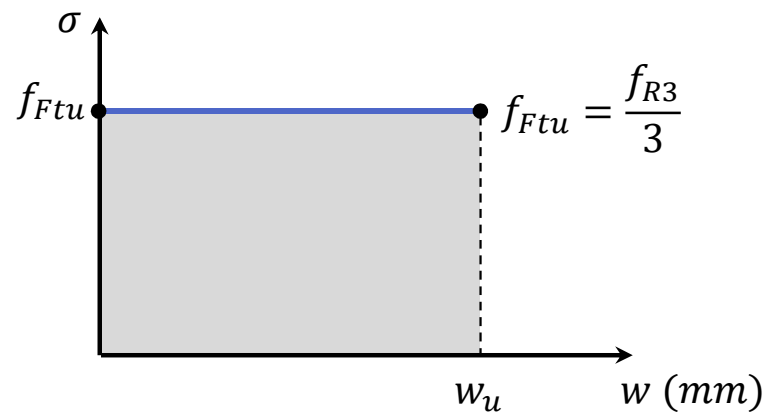


$$f_{Fts} = 0.45 f_{R1}$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} (f_{Fts} - 0.5 f_{R3} + 0.2 f_{R1}) \geq 0$$

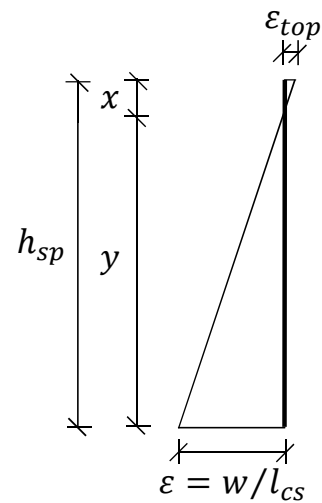
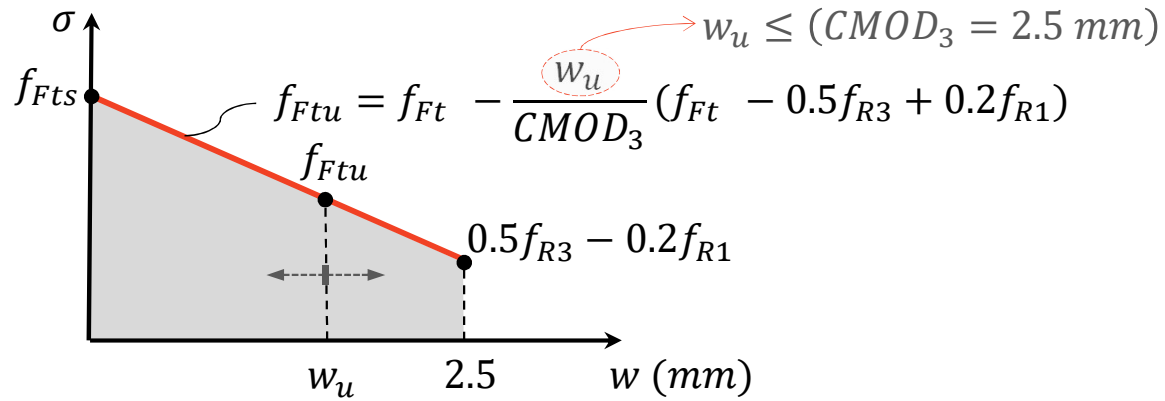
Leis constitutivas para o comportamento à tração (pós-fissuração)

Rigid plastic model

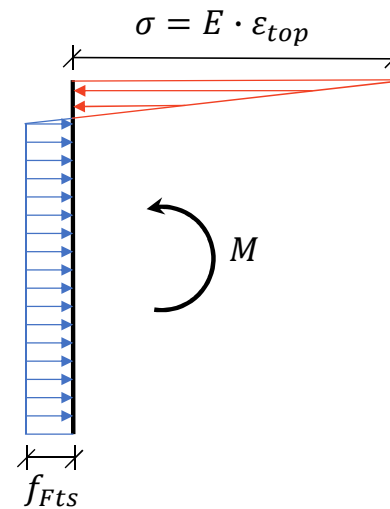


Leis constitutivas para o comportamento à tração (pós-fissuração)

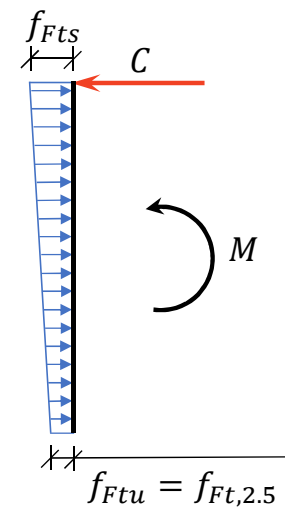
Linear model



(a)



(b)



(c)

Coeficientes de segurança parciais

Design strengths		Partial safety factors (γ)		
		ULS		SLS
		persistent and transient situations	accidental situations	
SFRC in compression	$f_{Ftud} = f_{Ftuk} / \gamma_F$	As plain concrete (1.5)	As plain concrete (1.2)	1.0
SFRC in tension (limit of linearity)	and			
SFRC in tension (residual strength)	$f_{Ftsd} = f_{Ftsk} / \gamma_F$		1.5	

Obs.: $\gamma_F \geq 1.3$ pode ser adotado se procedimentos de controle foram aplicados ao CFR



Fator de orientação

- $f_{Ftsd,mod} = f_{Ftsd}/K$
- $f_{Ftud,mod} = f_{Ftud}/K$

$K = 1.0$ - distribuição isotrópica

$K < 1.0$ - para efeitos favoráveis (validados experimentalmente)

$K > 1.0$ - para efeitos desfavoráveis (validados experimentalmente)

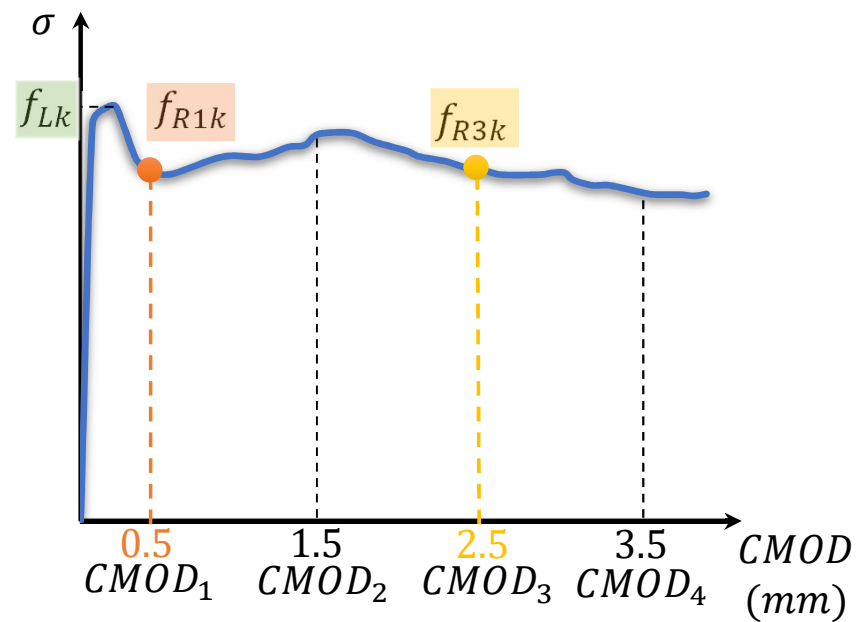
Estado Limite Último (ELU)

CRF pode substituir armadura convencional parcialmente ou totalmente se:

$$\frac{f_{R1k}}{f_{Lk}} > 0.4$$

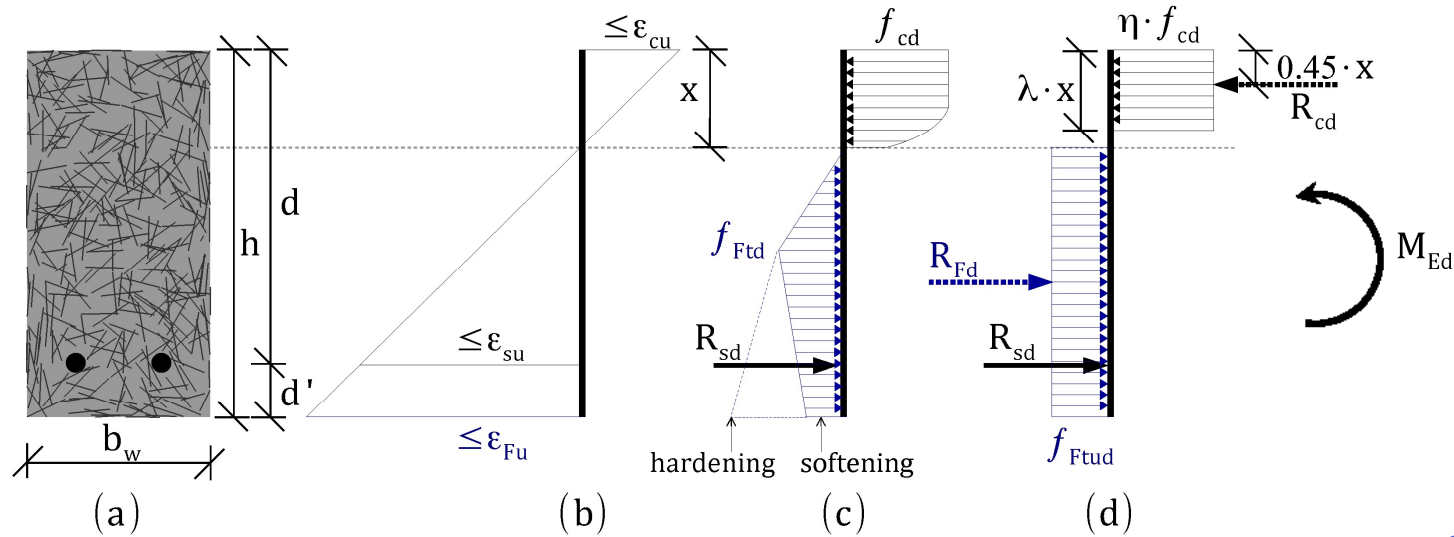
and

$$\frac{f_{R3k}}{f_{R1k}} > 0.5$$



Estado Limite Último (ELU)

Flexão em Vigas de CRF



Equilíbrio da seção

SFRC

$$M_{Ed} = \eta \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot x \cdot b_w \cdot (d - 0.45 \cdot x) - f_{Ftud} \cdot (h - x) \cdot b_w \cdot \left[\frac{(h - x)}{2} - d' \right]$$

$$A_s = \frac{M_{Ed} - f_{Ftud} \cdot (h - x) \cdot b_w \cdot \left[\frac{(h - x)}{2} + (x - 0.45 \cdot x) \right]}{f_{yd} \cdot (d - 0.45 \cdot x)} \text{ SFRC}$$

Estado Limite Último (ELU)

Cisalhamento em Vigas

- Vigas sem armadura convencional (flexão e cisalhamento):

Para CFR com comportamento de “hardening” a tensão principal σ_1 não deve ser maior que a resistência à tração última de projeto.

$$\sigma_1 \leq \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_f}$$

f_{Ftuk} é a resistência característica última e deve ser calculada utilizando o modelo constitutivo linear para $w_u = 1,5 \text{ mm}$

f_{Ftuk} deve ser determinado com teste uniaxial de tração.

Estado Limite Último (ELU)

Cisalhamento em Vigas

- Estribos não são necessários em vigas de CRF se:

$$f_{Ftuk} \geq 0.08\sqrt{f_{ck}}$$

- Vigas com fibras e estribos como armadura de cisalhamento:

$$V_{Rd} = V_{Rd,F} + V_{Rd,s} \geq V_{Ed}$$

- Resistência ao cisalhamento de vigas de SFRC

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho_l \cdot \left(1 + 7.5 \cdot \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_W \cdot d$$

- Resistência ao cisalhamento mínima para vigas de CFR: $V_{Rd,F} > V_{Rd,Fmin}$

$$V_{Rd,Fmin} = \left\{ 0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_W \cdot d$$

Estado Limite Último (ELU)

Torsão em Vigas

- Vigas sem reforço convencional (longitudinal e transversal)

Para CFR com comportamento de “hardening” a tensão principal σ_1 não deve ser maior que a resistência à tração última de projeto.

$$\sigma_1 \leq \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_f}$$

f_{Ftuk} é a resistência característica última e deve ser calculada utilizando o modelo constitutivo linear para $w_u = 1,5 \text{ mm}$

f_{Ftuk} deve ser determinado com teste uniaxial de tração.

- Vigas com armaduras longitudinal e transversal

A presença de fibras aumenta a capacidade torsional, mas não há modelos de projeto disponíveis. Modelos devem ser comprovados através de ensaios experimentais em escala.

Estado Limite Último (ELU)

Paredes

- Paredes sem armadura convencional

Para elementos 2D submetidos à carregamentos no próprio plano, é possível verificar o critério estado limite para ELS e ELU através do domínio de falha biaxial, nos quais as resistências uniaxiais à tração são reduzidas para f_{Fts} e f_{Ftu} , de acordo com o estado limite considerado.

- Paredes com armadura convencional

A contribuição das fibras pode ser avaliada através de análises não lineares via MEF ou modelos biela-tirante com os modelos rígido plástico e linear.

* Atendendo as condições mínimas abaixo, armaduras convencionais secundárias podem ser desprezadas.

$$\frac{f_{R1k}}{f_{Lk}} > 0.4$$

$$\frac{f_{R3k}}{f_{R1k}} > 0.5$$

Estado Limite Último (ELU)

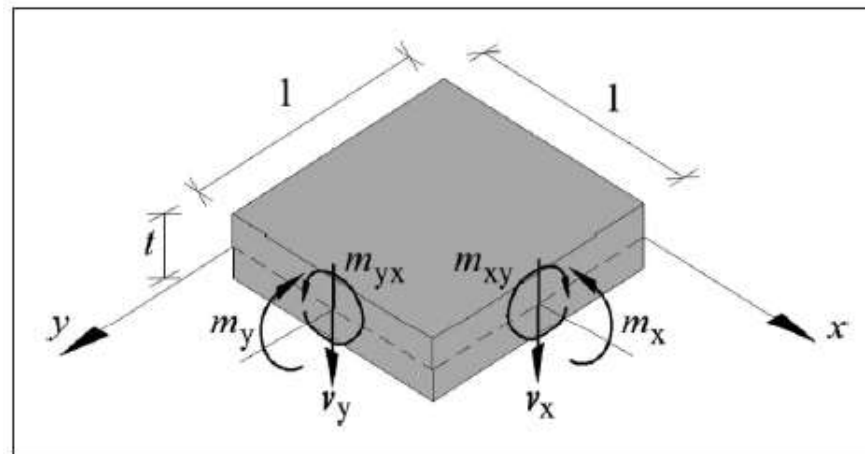
Lajes

○ Lajes sem armadura convencional

Para lajes sem armadura convencional com ações predominantemente de flexão, sua resistência pode ser verificada com relação ao momento resistente, m_{Rd} , calculado considerando um modelo rígido plástico.

$$m_{Rd} = \frac{f_{tud} \cdot t^2}{2}$$

Quando uma análise linear é realizada, o momento principal máximo deve ser menor que , m_{Rd} , calculado.



Estado Limite Último (ELU)

Lajes

○ Lajes com armadura convencional

A verificação de elementos com armadura convencional pode ser feita através de análises não lineares (ex.: análise limite ou análise não linear via MEF)

○ Punção

$$V_{Rd} = V_{Rd,F} + V_{Rd,s} \geq V_{Ed}$$

$$V_{Rd,F} = V_{Rd,c} + V_{Rd,f} \geq V_{Ed}$$

$$V_{Rd,f} = \frac{f_{Ftuk}}{\gamma_f} \cdot b_0 \cdot d_v$$

Condição mínima para utilização de fibras como armadura de punção:

$$V_{Rd,s} + V_{Rd,f} \geq 0,5 \cdot V_{Ed}$$

b_0 é o perímetro de controle de resistência ao cisalhamento

d_v é a profundidade efetiva de resistência ao cisalhamento

f_{Ftuk} é a resistência característica última e deve ser calculada utilizando o modelo constitutivo linear para $w_u = 1,5 \text{ mm}$

Estado Limite de Serviço (ELS)

Abertura de fissura

$$w_d = 2 \left\{ k \cdot c + \frac{1}{4} \frac{\phi_s}{\rho_{s,ef}} \cdot \frac{(f_{ctm} - f_{Ftsm})}{\tau_{bm}} \right\} \cdot \left(\frac{\sigma_s - \beta \cdot \sigma_{sr}}{E_s} + \eta_r \cdot \varepsilon_{sh} \right)$$

$f_{Ftsm} = \frac{f_{Ftsk}}{0.7}$

$\sigma_{sr} = (f_{ctm} - f_{Ftsm}) \cdot \frac{(1 + \alpha_e \cdot \rho_s)}{\rho_{s,ef}}$

σ_{sr} é a tensão máxima do aço na fissura no estágio de formação de fissura

O valor da tensão do aço na fissura σ_s precisa levar em conta o efeito das fibras

- Reforço mínimo para controle de fissuração:

$$A_{s,min} = k_c \cdot k \cdot (f_{ctm} - f_{Ftsm}) \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

Se $A_{s,min} < 0$, é permitido o uso de fibras como reforço para controle de fissuração

Estado Limite de Serviço (ELS)

Abertura de fissura

- Espaçamento médio entre fissuras:

$$s_{rm} = 1.17 \cdot l_{s,max} \quad l_{s,max} = \left(k \cdot c + \frac{1}{4} \frac{\phi_s}{\rho_{s,ef}} \cdot \frac{(f_{ctm} - f_{Ftsm})}{\tau_{bm}} \right)$$

[1] Tiberti, G., Minelli, F., and Plizzari, G. Cracking behavior in reinforced concrete members with steel fibers: A comprehensive experimental study. *Cement and Concrete Research*, 68, 11 2014.

Flecha

$$\delta = \zeta \cdot \delta_{II} + (1 + \zeta) \cdot \delta_I \quad \zeta = 1 - \beta \cdot \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2$$

δ_I é a flecha calculada para o momento de inércia da seção de concreto não fissurada;
 δ_{II} é a flecha calculada para o momento de inércia da seção totalmente fissurada;
 ζ é um coeficiente de interpolação.
