

Modelagem numérica do comportamento pós-fissuração do CRFA e sua aplicação ao projeto de vigas de acordo com *fib* Model Code 2010

Numerical modeling of the
post-cracking behavior of SFRC
and its application on design of beams
according to *fib* Model Code 2010

Luís A. G. Bitencourt Jr.
Yasmin Teixeira Trindade

São Paulo
01/11/2019

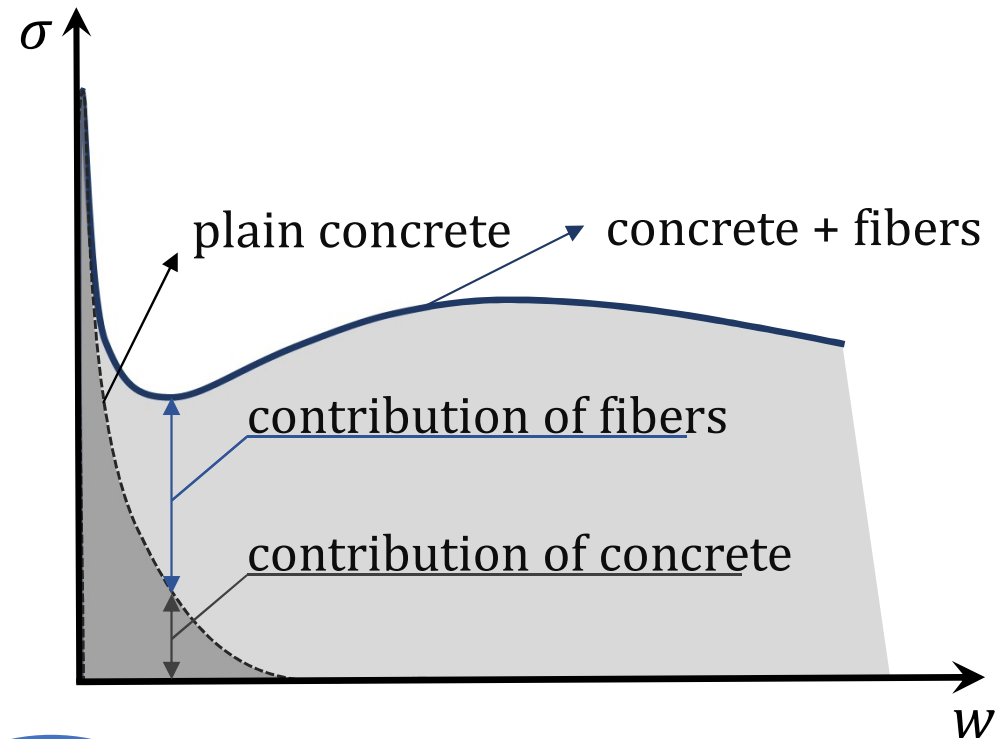
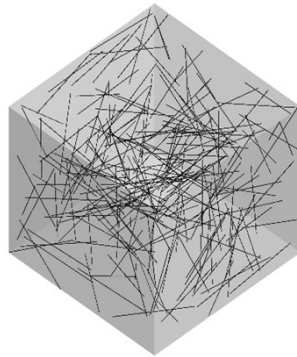
1

Introdução

Concreto Reforçado com Fibra de Aço (CRFA)

Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)

SFRC: fibras de aço curtas dispersas aleatoriamente numa matriz de concreto.



a principal contribuição na pós-fissuração

age como ponte de transferência de tensão

adição de fibras de aço

aumenta a ductilidade e tenacidade

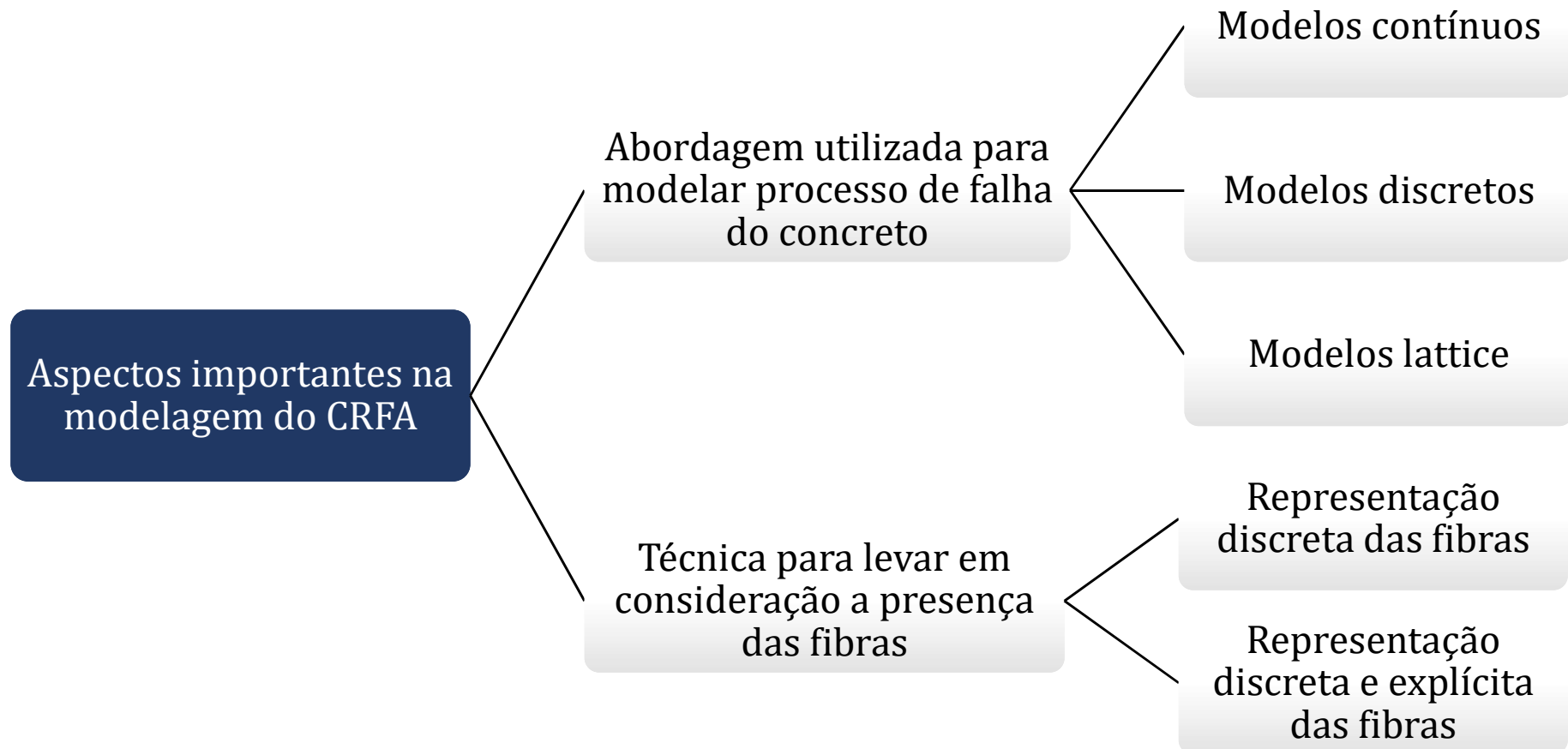
pode ser usada como reforço primário ou secundário

Motivação

- Utilização de modelos em multiescala com representação discreta das fibras:
 - ✓ Simular uma série de casos, variando o tipo, disposição e distribuição das fibras e sua interação com o concreto;
 - ✓ Modelar elementos estruturais de CA-CRFA a fim de verificar o comportamento previsto obtido em diretrizes e/ou normas;
 - ✓ Preencher as lacunas deixadas por testes experimentais, como o tratamento de problemas com condições de contorno arbitrárias, problemas envolvendo distribuições de tensão difusa e orientação preferenciais das fibras;
-

1 Introdução

Abordagens numéricas para a modelagem do comportamento pós-fissuração do CRFA



1 Introdução

Objetivos

Modelo numérico com representação discreta e explícita de fibras de aço (Bitencourt Jr., 2015, Bitencourt Jr. et al., 2019)

Avaliar o desempenho pós-fissuração do SFRC e sua aplicação no projeto de vigas RC-SFRC

Avaliar a capacidade do modelo em capturar a resposta do teste de caracterização de SFRC de acordo com EN 14651 (2005)

Obtenção dos parâmetros da interface fibra de concreto através da simulação numérica de ensaios EN 14651 (2005)

Verificar a capacidade do modelo numérico de capturar a resposta estrutural e o modo de falha na simulação de vigas RC e RC-SFRC testadas experimentalmente.

Dimensionar vigas RC e RC-SFRC de acordo com *fib* Model Code 2010 (2013) e analisar numericamente

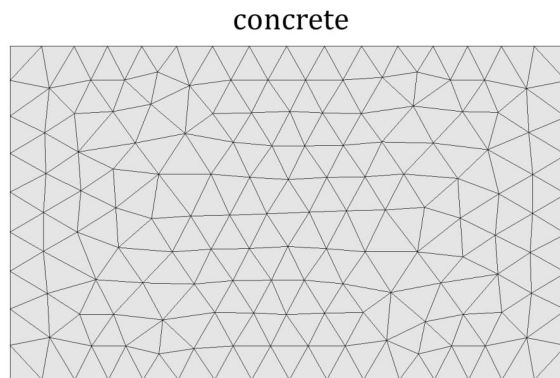
Comparar as análises numéricas com as previsões de projeto em termos de ELS e ELU

2

Modelo numérico

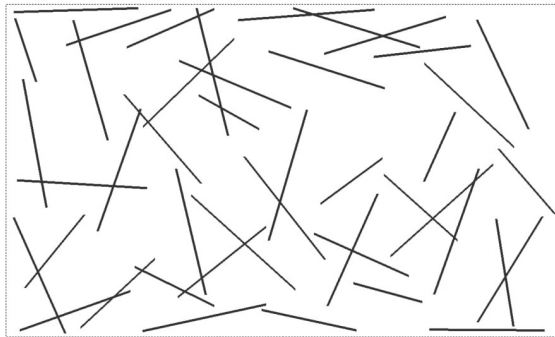
2 Modelo numérico

Representação discreta e explícita dos reforços



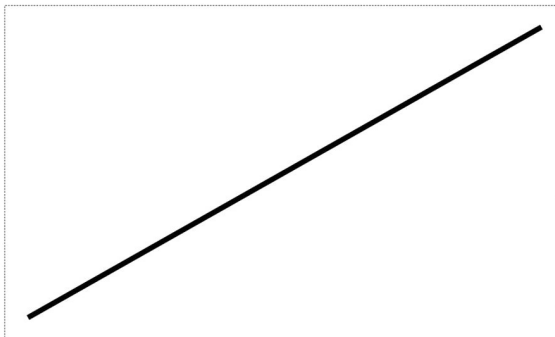
(a)

steel fiber cloud



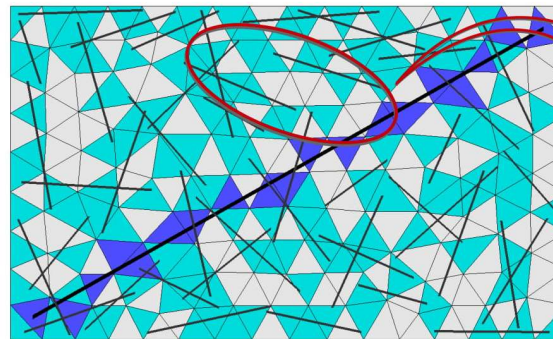
(b)

rebar

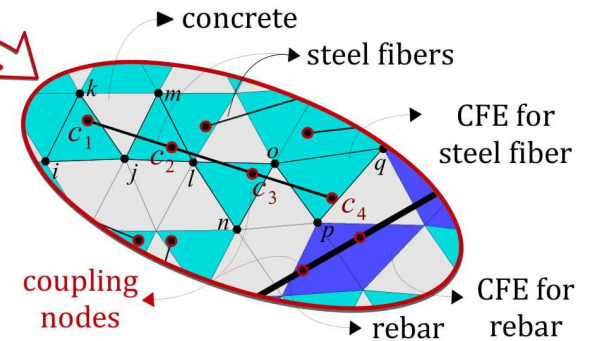


(c)

reinforcement-concrete interaction
(coupling finite elements - CFEs)



(d)



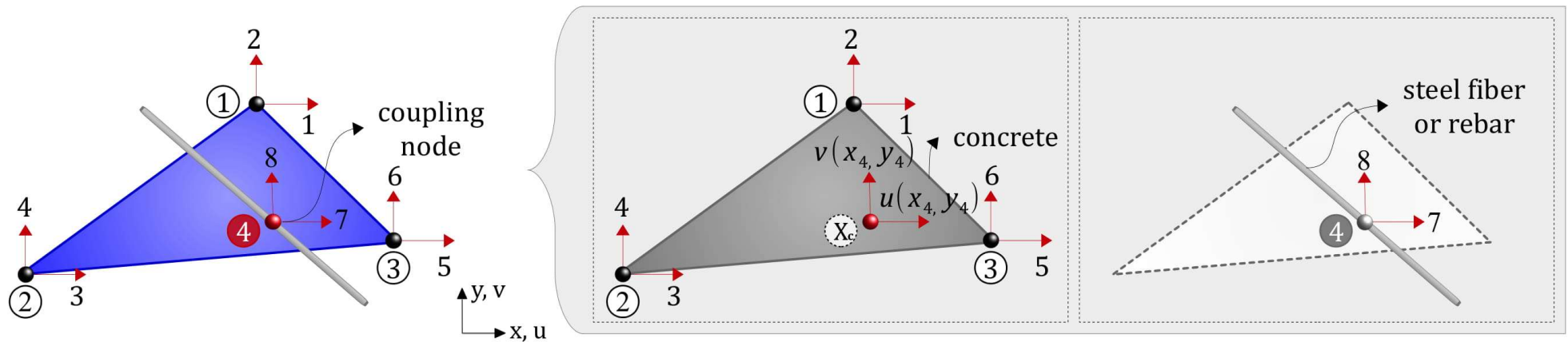
(e)

$$\mathbf{F}^{int} = \underbrace{A_{e=1}^{nel_C} (\mathbf{F}_e^{int})_C}_{\text{concrete elements}} + \underbrace{A_{e=1}^{nel_R} (\mathbf{F}_e^{int})_R}_{\text{reinforcements}} + \underbrace{A_{e=1}^{nel_{CFE}} (\mathbf{F}_e^{int})_{CFE}}_{\text{coupling elements}}$$

$$\mathbf{K} = \underbrace{A_{e=1}^{nel_C} (\mathbf{K}_e)_C}_{\text{concrete elements}} + \underbrace{A_{e=1}^{nel_R} (\mathbf{K}_e)_R}_{\text{reinforcements}} + \underbrace{A_{e=1}^{nel_{CFE}} (\mathbf{K}_e)_{CFE}}_{\text{coupling elements}}$$

2 Modelo numérico

Interação reforço-concreto



Deslocamento $\bar{\mathbf{U}}$ de um ponto material \mathbf{X}_p :

$$\bar{\mathbf{U}}(\mathbf{X}_p) = \bar{\mathbf{N}}(\mathbf{X}_p) \bar{\mathbf{D}}$$

Reescrevendo:

$$[[\mathbf{U}]](\mathbf{X}_c) = \mathbf{B}_e(\mathbf{X}_c) \mathbf{D}_e$$

Deslocamento relativo $[[\mathbf{U}]]$:

$$[[\mathbf{U}]](\mathbf{X}_c) = \mathbf{D}_c - \bar{\mathbf{U}}(\mathbf{X}_c)$$

$\mathbf{X}_c = (x_4, y_4)$

$$\mathbf{B}_e = [-\bar{\mathbf{N}}_1(\mathbf{X}_c) \quad -\bar{\mathbf{N}}_2(\mathbf{X}_c) \quad -\bar{\mathbf{N}}_3(\mathbf{X}_c) \quad \mathbf{I}]$$

$$\mathbf{D}_e = \left\{ \mathbf{D}_1 \quad \mathbf{D}_2 \quad \mathbf{D}_3 \quad \mathbf{D}_c \right\}$$

deslocamento do
nó de acoplamento

2 Modelo numérico

Interação reforço-concreto

Vetor de forças internas do CFE:

$$\mathbf{F}_e^{int} = \mathbf{B}_e^T \mathbf{F}([\mathbf{U}])$$

Matrix de rigidez tangente do CFE:

$$\mathbf{K}_e = \frac{\partial \mathbf{F}_e^{int}}{\partial \mathbf{D}_e} = \mathbf{B}_e^T \mathbf{C}_{tg} \mathbf{B}_e$$

$$\mathbf{C}_{tg} = \partial \mathbf{F}([\mathbf{U}]) / \partial [\mathbf{U}] \quad (\text{tangent operator})$$

2 Modelo numérico

Interação reforço-concreto
Aderência perfeita

$$\mathbf{F} = \mathbf{C}[\mathbf{U}] = \mathbf{C}\mathbf{B}_e\mathbf{D}_e \quad (\text{força de reação})$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \tilde{C} & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{C} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{C} \end{bmatrix} \quad (\text{matriz de constantes elásticas})$$

$$\tilde{C} = 10^6 \text{ to } 10^9 \text{ N/mm} \quad (\text{Bitencourt, 2015})$$

Quando as constantes elásticas tendem a um valor muito alto, as componentes do deslocamento relativo $[[\mathbf{U}]]$ tendem a zero.

2 Modelo numérico

Interação reforço-concreto Perda de aderência

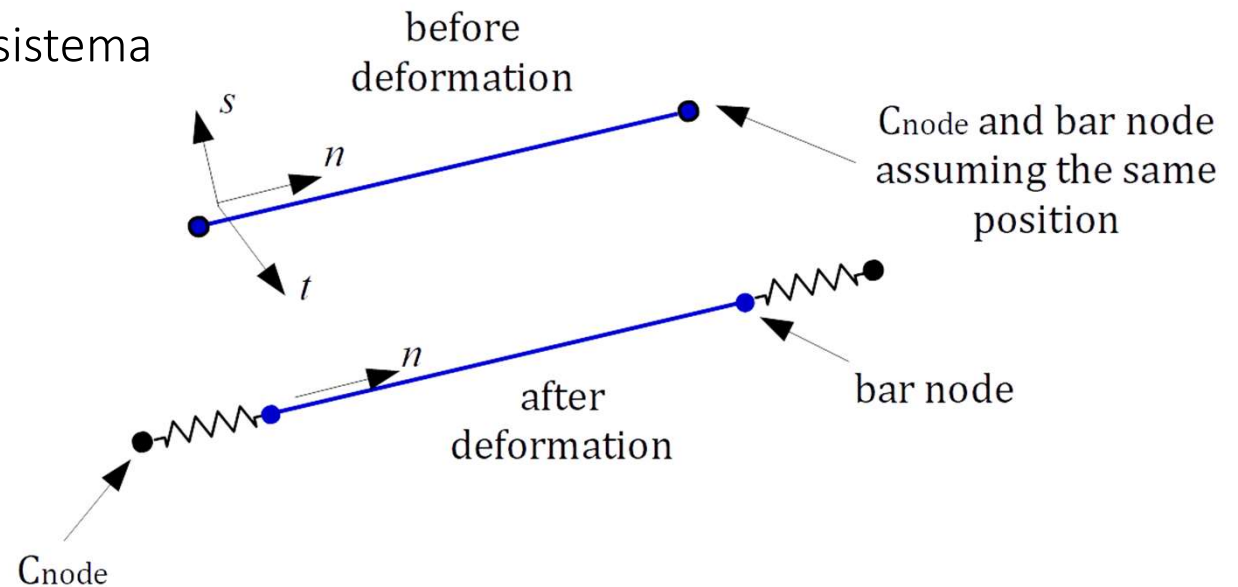
O deslocamento relativo usando o sistema de coordenadas local ($\mathbf{n}, \mathbf{s}, \mathbf{t}$):

$$[[\mathbf{u}]] = \mathbf{R}[[\mathbf{U}]]$$

e força de reação:

$$\mathbf{f} = \mathbf{R}\mathbf{F}$$

\mathbf{R} é a matriz de rotação



Matriz de constantes elásticas (local)

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_n & 0 & 0 \\ 0 & c_s & 0 \\ 0 & 0 & c_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_n & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{c} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{c} \end{bmatrix}, \quad c_n \ll \tilde{c}.$$

2 Modelo numérico

Interação reforço-concreto Perda de aderência

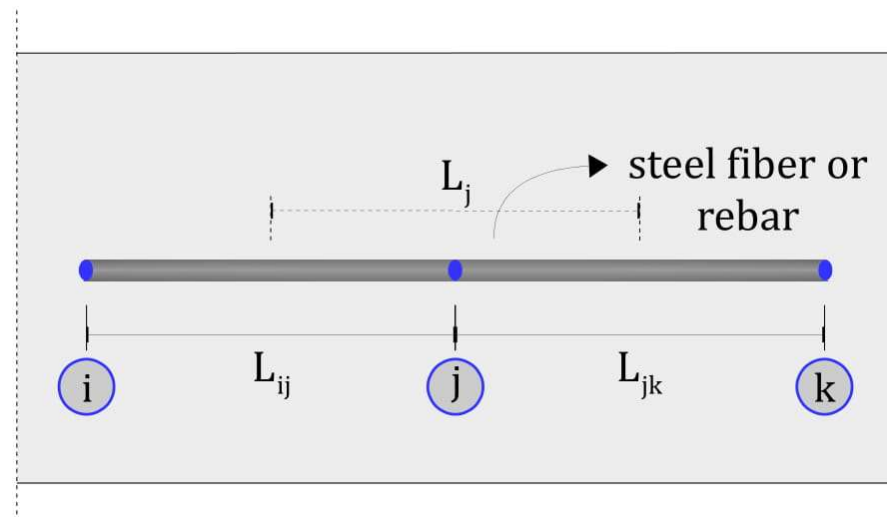
Força de reação nas direções (**n**, **s**, **t**):

$$f_n = \tau(\llbracket u_n \rrbracket) P L$$

$$f_s = \tilde{c} \llbracket u_s \rrbracket$$

$$f_t = \tilde{c} \llbracket u_t \rrbracket$$

$$L = (L_{ij} + L_{jk})/2$$



2 Modelo numérico

Interação reforço-concreto

Modelo de dano contínuo para descrever a interação reforço-concreto

- O modelo constitutivo é integrado por meio de um esquema de integração implícito-explicito (Impl-EX) (Oliver et al. (2008) and Prazeres et al. (2015))

$$\text{Relação constitutiva: } \tau = (1 - d) \bar{\tau}$$

$$\text{Tensão de cisalhamento efetiva: } \bar{\tau} = c_n \llbracket u_n \rrbracket$$

$$\text{Critério de danificação: } \bar{\phi} = \llbracket \bar{\tau} \rrbracket - r \leq 0$$

$$\text{Lei de evolução da variável interna: } r = \max(\bar{\tau})$$

$$\text{Evolução da variável de dano: } d = 1 - \frac{q(r)}{r}.$$

2 Modelo numérico

Interação reforço-concreto

Modelo de dano contínuo para descrever a interação reforço-concreto

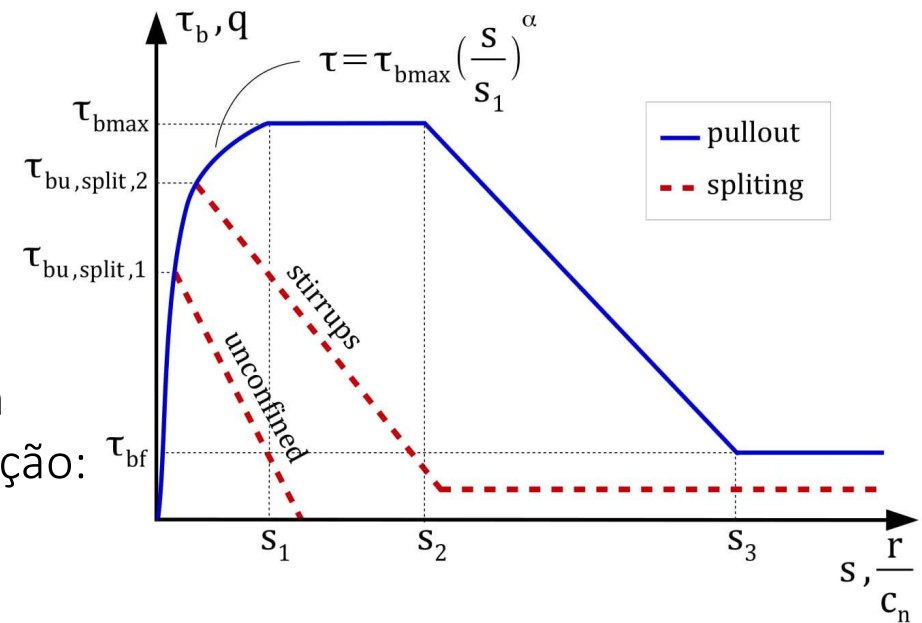
Interação armadura-concreto

A relação entre a tensão de cisalhamento (tensão de aderência) e o deslizamento entre a armadura e o concreto proposta pelo *fib* Model Code 2010 (2013):

$$\tau(s) = \begin{cases} \tau_{bmax} \left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha & \text{if } s \leq s_1 \\ \tau_{bmax} & \text{if } s_1 \leq s \leq s_2 \\ \tau_{bmax} - \frac{(\tau_{bmax} - \tau_{bf})(s - s_2)}{s_3 - s_2} & \text{if } s_2 \leq s \leq s_3 \\ \tau_{bf} & \text{if } s > s_3 \end{cases}$$

e a correspondente lei de endurecimento/ amolecimento do modelo constitutivo definida em termos das variáveis internas de tensão e deformação:

$$q(r) = \begin{cases} \tau_{bmax} \left(\frac{r/c_n}{s_1}\right)^\alpha & \text{se } r/c_n \leq s_1 \\ \tau_{bmax} & \text{se } s_1 \leq r/c_n \leq s_2 \\ \tau_{bmax} - \frac{(\tau_{bmax} - \tau_{bf})(r/c_n - s_2)}{s_3 - s_2} & \text{se } s_2 \leq r/c_n \leq s_3 \\ \tau_{bf} & \text{se } r/c_n > s_3 \end{cases}$$



2 Modelo numérico

Interação reforço-concreto

Modelo de dano contínuo para descrever a interação reforço-concreto

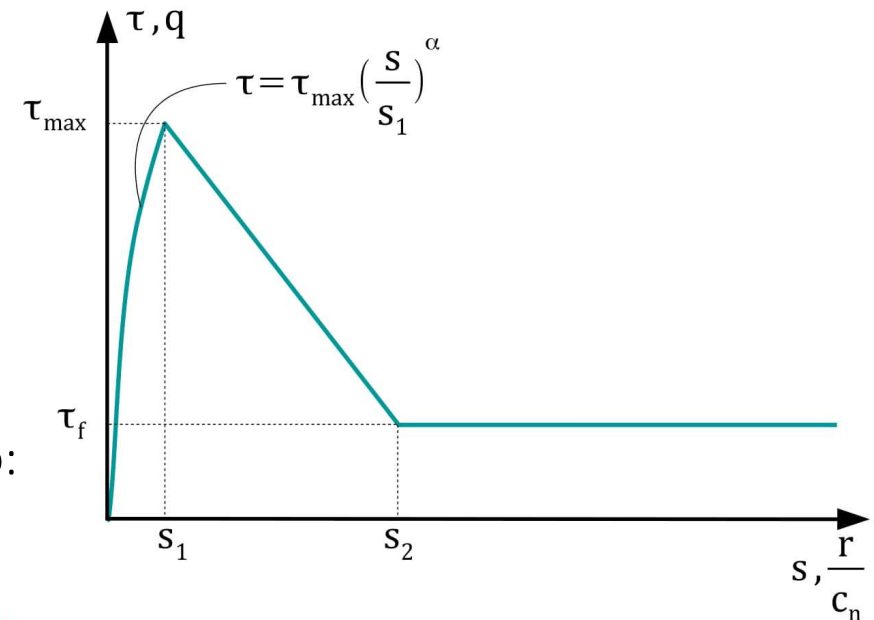
Interação fibra-concreto

Relação entre a tensão de cisalhamento (tensão de aderência) e o deslizamento entre a fibra com gancho e o concreto sugerida por Cunha (2010):

$$\tau(s) = \begin{cases} \tau_{max} \left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha & \text{if } s \leq s_1 \\ \tau_{max} - \frac{(\tau_{max} - \tau_f)(s - s_1)}{s_2 - s_1} & \text{if } s_1 \leq s \leq s_2 \\ \tau_f & \text{if } s > s_2 \end{cases}$$

e a correspondente lei de endurecimento/ amolecimento do modelo constitutivo definida em termos das variáveis interna de tensão e deformação:

$$q(r) = \begin{cases} \tau_{max} \left(\frac{r/c_n}{s_1}\right)^\alpha & \text{se } 0 \leq r/c_n \leq s_1 \\ \tau_{max} - \frac{(\tau_{max} - \tau_f)(r/c_n - s_1)}{s_2 - s_1} & \text{se } s_1 \leq r/c_n \leq s_2 \\ \tau_f & \text{se } r/c_n > s_2 \end{cases}$$

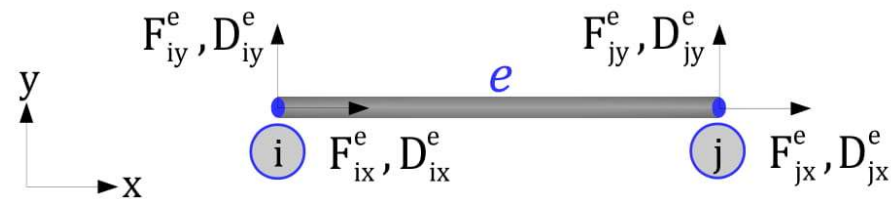


2 Modelo numérico

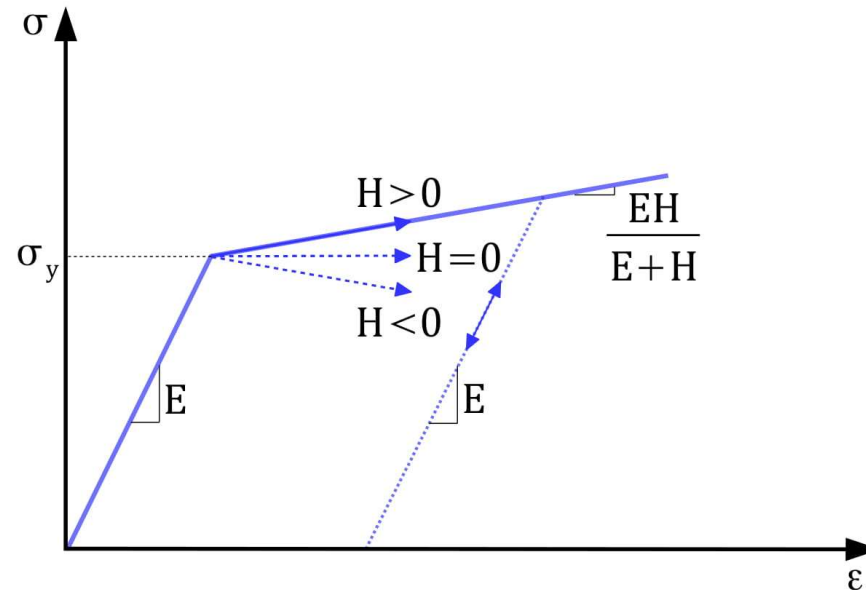
Modelagem dos reforços

Modelo elastoplástico unidimensional

Os reforços são representados por elementos finitos de dois nós (elementos de treliça)



e seu comportamento é descrito por um modelo elastoplástico unidimensional:

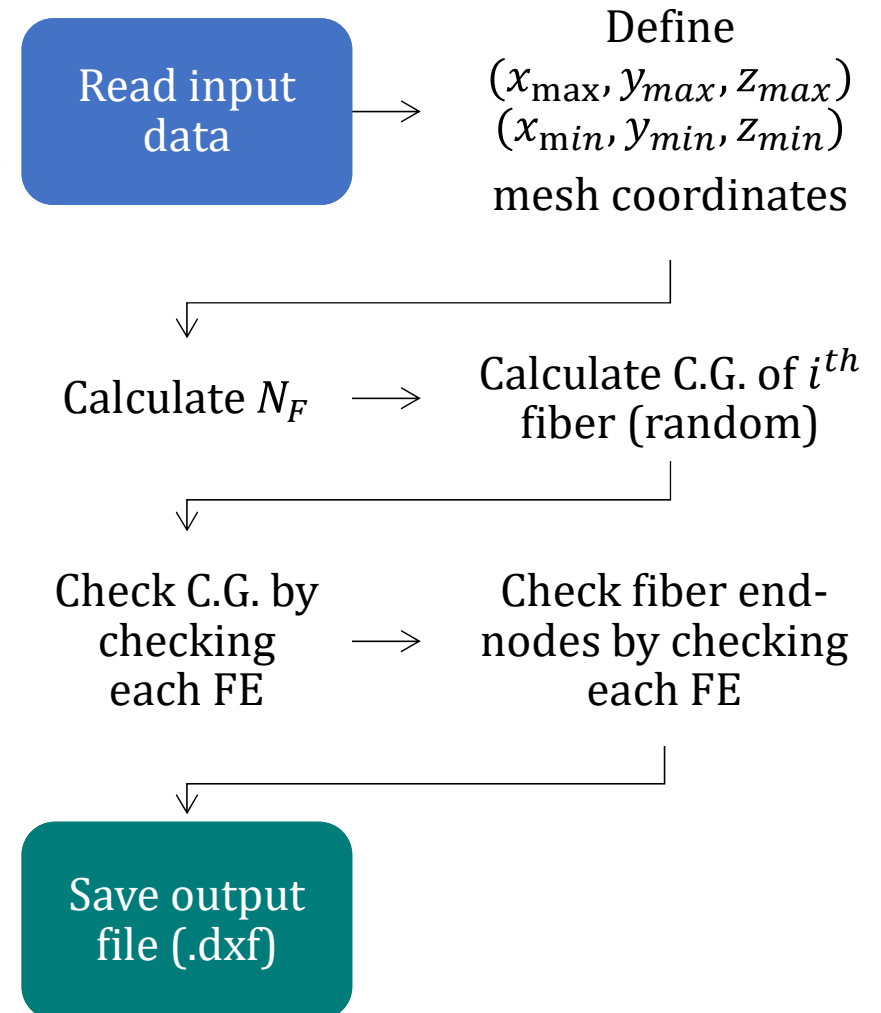


2 Modelo numérico

Modelagem dos reforços Distribuição das fibras de aço

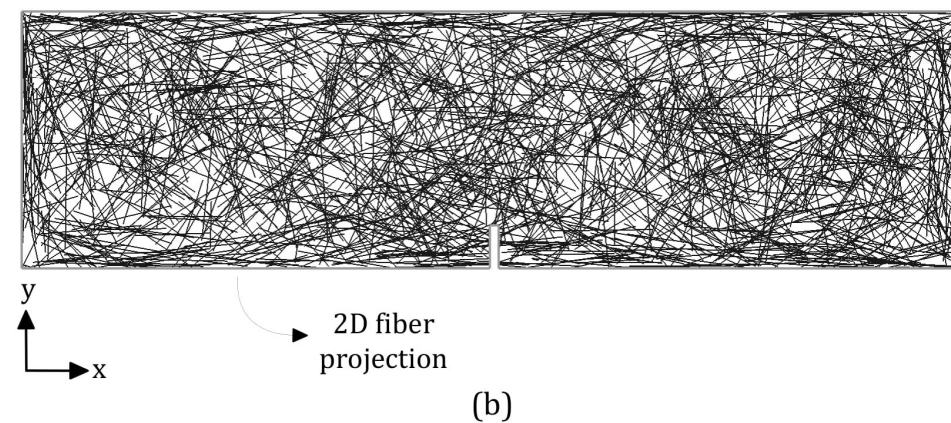
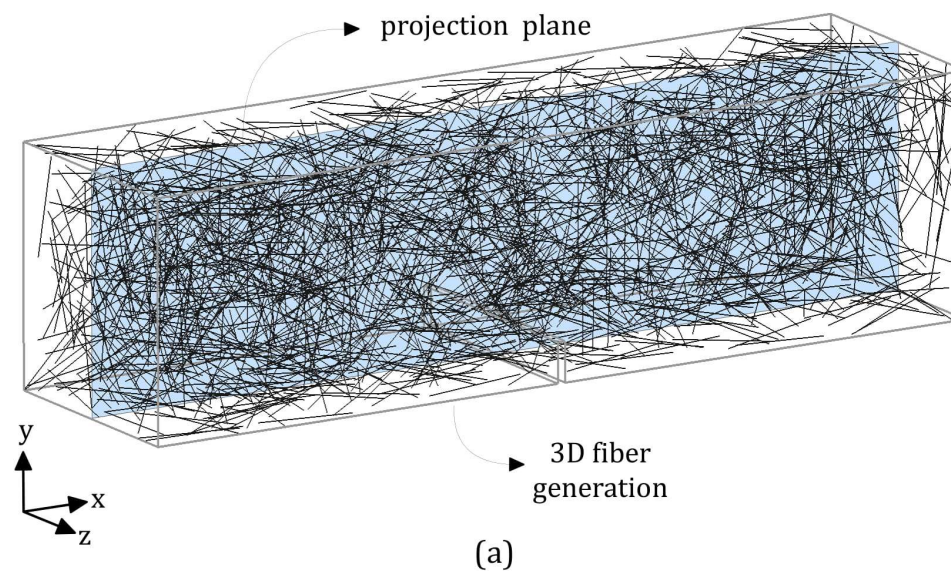
- Distribuição isotrópica uniforme randômica
- Considera um geometria arbitrária

```
Read input data
Define the maximums  $(x_{max}, y_{max}, z_{max})$  and minimums  $(x_{min}, y_{min}, z_{min})$ 
coordinates by reading the mesh node coordinates
Calculate  $N_F$ 
for  $n = 1 : N_F$ 
    Calculate the C.G. of  $i^{th}$  fiber  $\bar{\mathbf{X}} = (\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i)^\dagger$ 
        Check if the C.G. is valid by checking each finite element;
        Calculate the coordinates of the  $i^{th}$  fiber end-nodes  $\bar{\mathbf{X}}^e = (x_i^e, y_i^e, z_i^e)$ 
        considering the length of the fiber  $l_F$ .
        Check if the end-node coordinates are valid by checking each
        finite element;
    end for
Save output file
```



2 Modelo numérico

Modelagem dos reforços Distribuição das fibras de aço



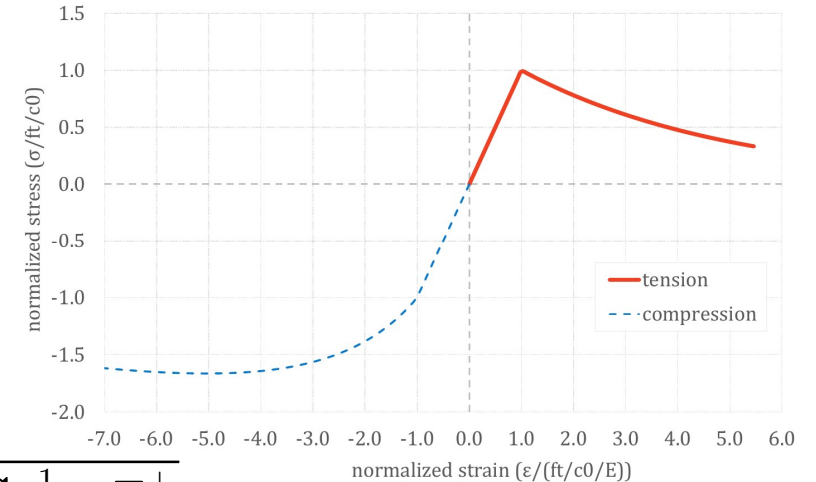
2 Modelo numérico

Modelagem do concreto

Modelo de dano com duas variáveis de dano independentes (Cerveral et al., 1996)

Relação constitutiva: $\boldsymbol{\sigma} = (1 - d^+) \bar{\boldsymbol{\sigma}}^+ + (1 - d^-) \bar{\boldsymbol{\sigma}}^-$

$$\text{Tensão efetiva: } \bar{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon} \begin{cases} \bar{\boldsymbol{\sigma}}^+ = \langle \bar{\boldsymbol{\sigma}} \rangle = \sum_{i=1}^3 \langle \bar{\boldsymbol{\sigma}}_i \rangle \mathbf{p}_i \otimes \mathbf{p}_i \\ \bar{\boldsymbol{\sigma}}^- = \bar{\boldsymbol{\sigma}} + \bar{\boldsymbol{\sigma}}^+ \end{cases}$$



Critério de danificação:

$$\bar{\phi}^{+/-}(\bar{\tau}^{+/-}, r^{+/-}) = \bar{\tau}^{+/-} - r^{+/-} \leq 0 \begin{cases} \bar{\tau}^+ = \sqrt{\bar{\boldsymbol{\sigma}}^+ : \mathbf{C}^{-1} : \bar{\boldsymbol{\sigma}}^+} \\ \bar{\tau}^- = \sqrt{\sqrt{3}(K\bar{\sigma}_{oct}^- + \bar{\tau}_{oct}^-)} \end{cases}$$

Lei de evolução da variável interna: $r^{+/-} = \max(r_0^{+/-}, \bar{\tau}^{+/-})$

Evolução da variável de dano:

$$d^+ = 1 - \frac{r_0^+}{r^+} e^{-A^+ \left(1 - \frac{r^+}{r_0^+}\right)} \quad e \quad d^- = 1 - \frac{r_0^-}{r^-} \left(1 - A^-\right) - A^- e^{-B^- \left(1 - \frac{r^-}{r_0^-}\right)}$$

$$\frac{1}{A^+} = \frac{1}{2\bar{H}^+} \left(\frac{1}{l_{ch}} - \bar{H}^+ \right) \geq 0$$

$$\bar{H}^+ = (f_t)^2 / 2EG_f^+$$

- O modelo constitutivo é integrado por meio do Impl-EX

2 Modelo numérico

Resumo

Interação reforço-concreto

- CFE (coupling finite element)
- Modelo de dano contínuo para descrever a interação reforço-concreto
 - aderência perfeita
 - perda de aderência (fibras de aço e armadura)

Modelagem dos reforços

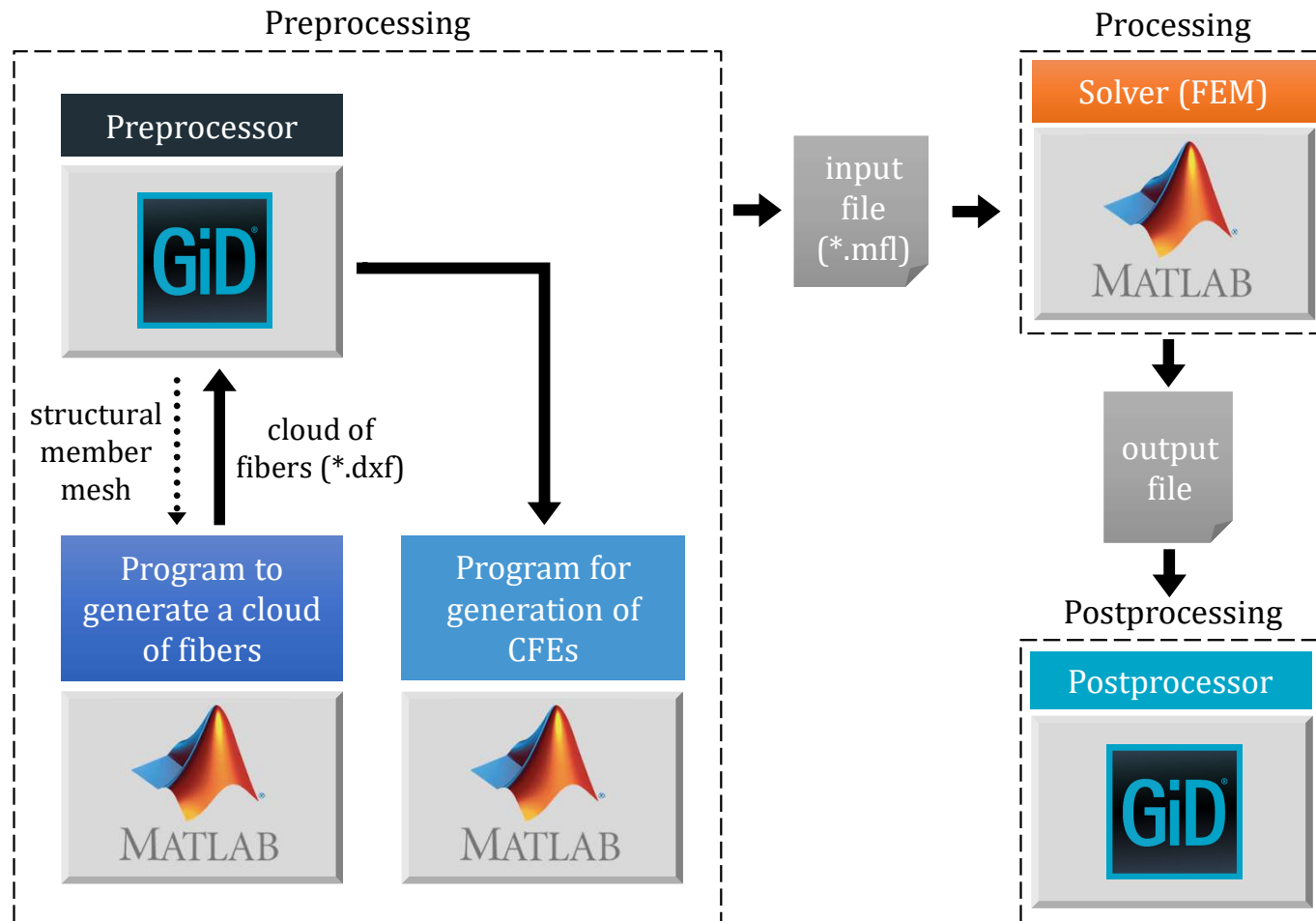
- Modelo elastoplástico unidimensional
- Elemento de treliça
- Distribuição das fibras de aço:
 - Distribuição isotrópica uniforme randômica
 - Geometria arbitrária
 - Projeção das fibras

Modelagem do concreto

- Modelo de dano com duas variáveis de dano independentes (Cerveral et al., 1996)
 - Tração
 - Compressão

2 Modelo numérico

Programas utilizados para a simulação numérica



3

Aplicações

3 Aplicações

Simulação numérica do ensaio de flexão de três pontos - EN 14651

Descrição das vigas

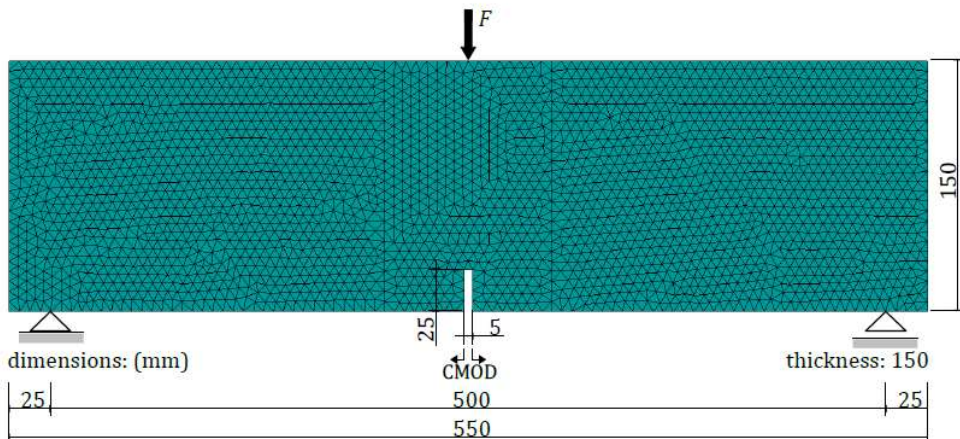


Geometrical and mechanical properties of the steel fibers.

Type of fiber	DRAMIX® RC 80/60 BN
Length l_F	60 mm
Diameter d_F	0.75 mm
Yield stress σ_Y	1225 MPa
Young's modulus E_F	210 GPa

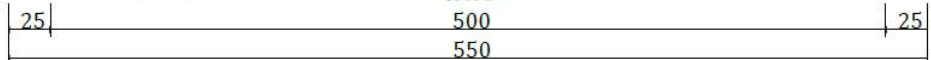
Concrete parameters for the three-point bending tests - EN14651.

Characteristic compressive strength f_{ck}	35 MPa
Tensile strength f_{ct}	2.35 MPa
Young's modulus E_c	35 GPa
Poisson's ratio ν	0.2
Fracture energy G_f	100 N/m
Compression parameters	$A^- = 1.0$ and $B^- = 0.89$



dimensions: (mm)

thickness: 150



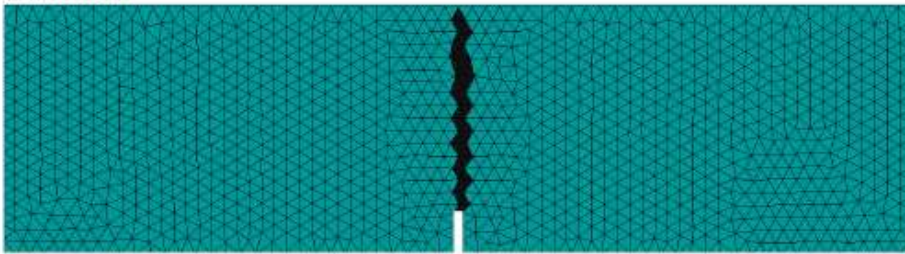
3 Aplicações

Simulação numérica do ensaio de flexão de três pontos - EN 14651

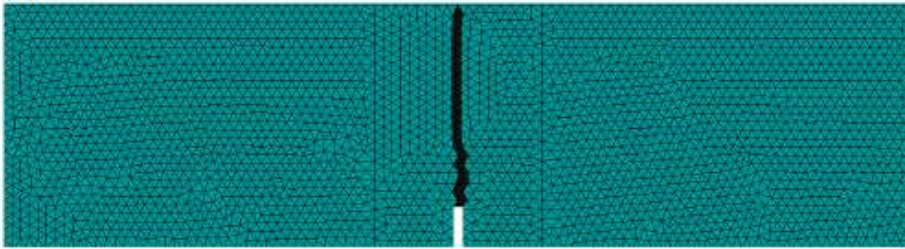
Estudo de sensibilidade de malha: Concreto simples

Padrão de fissura:

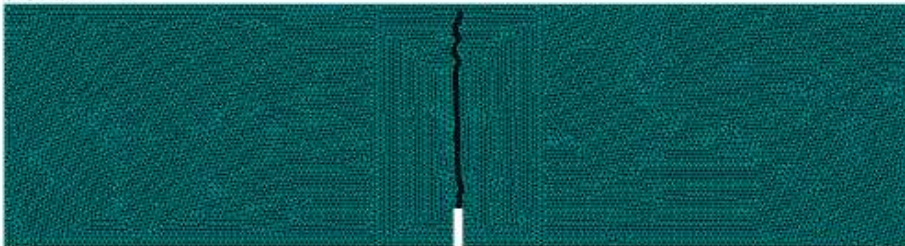
(a) Mesh 1



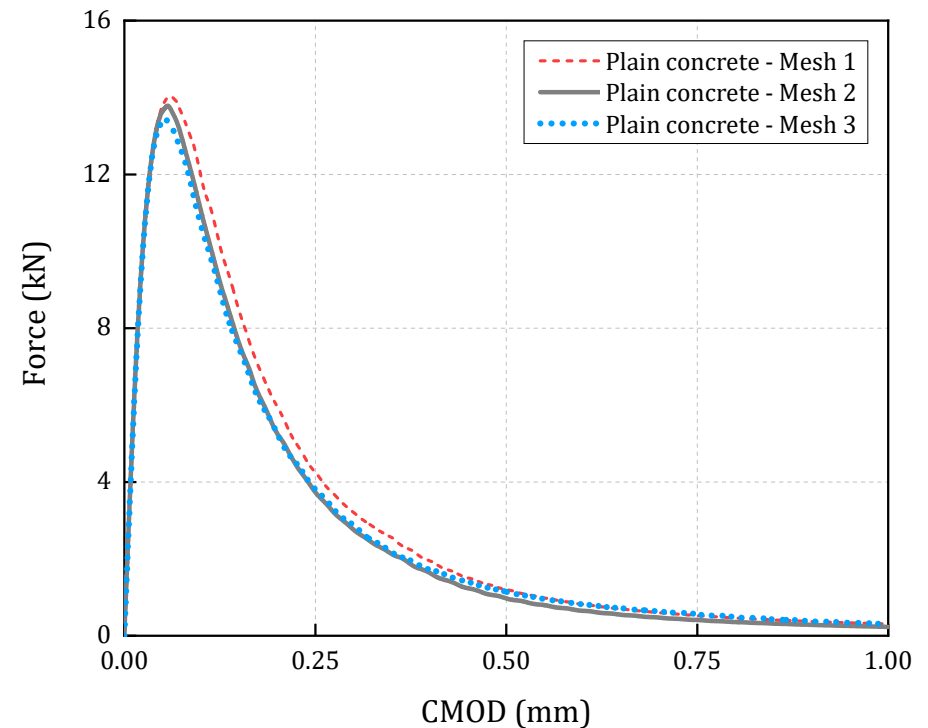
(b) Mesh 2



(c) Mesh 3



Mesh	Number of three-noded triangular finite elements
1 (coarse)	2311
2 (medium)	5173
3 (fine)	20758



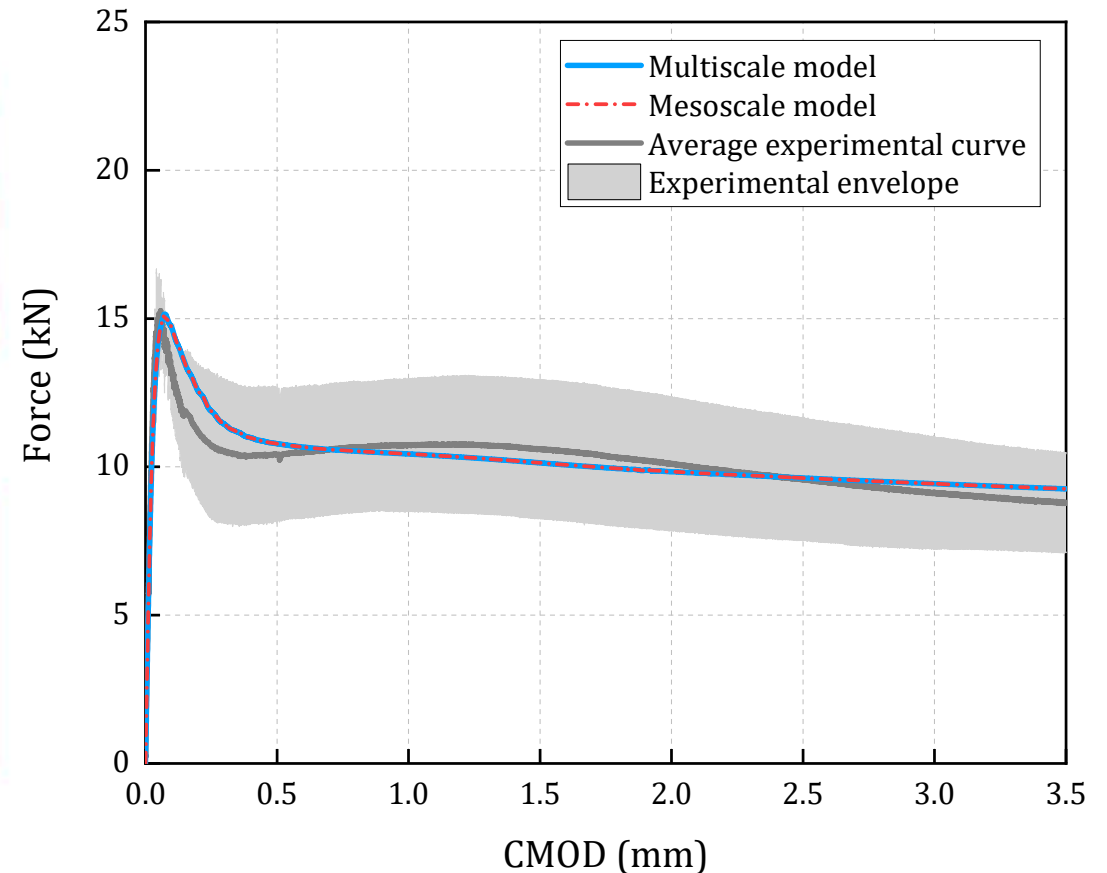
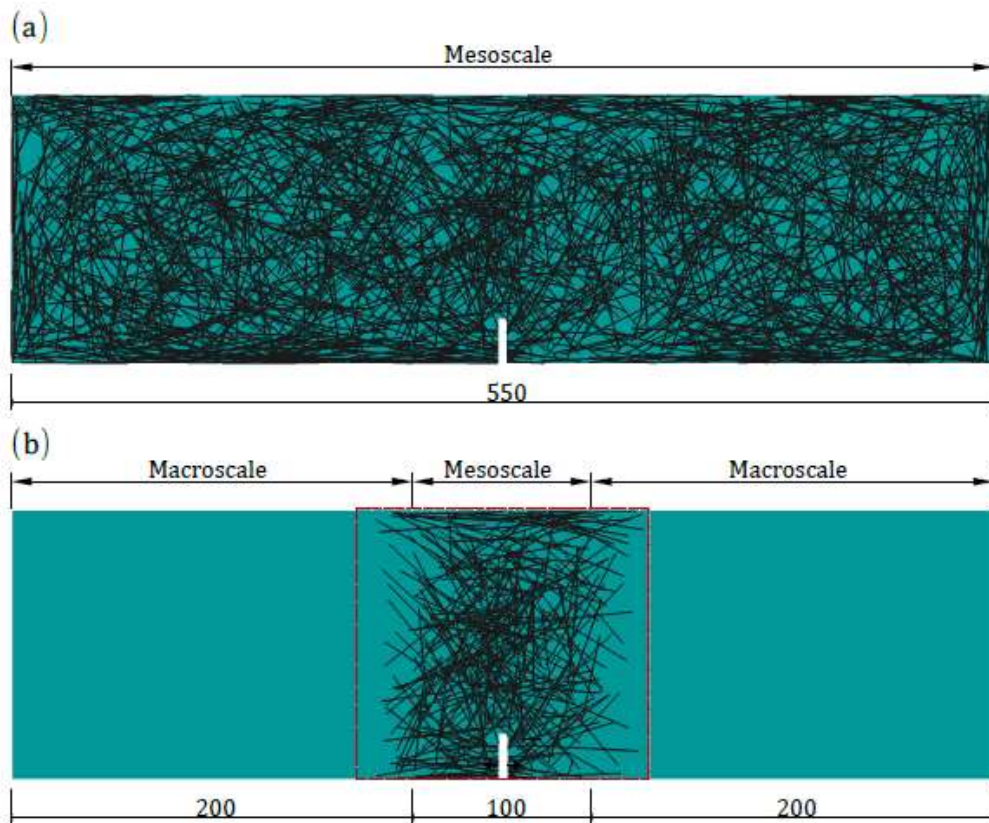
3 Aplicações

Simulação numérica do ensaio de flexão de três pontos - EN 14651

Modelo mesoescala vs. Modelo multiescala concorrente

30 kg/m^3

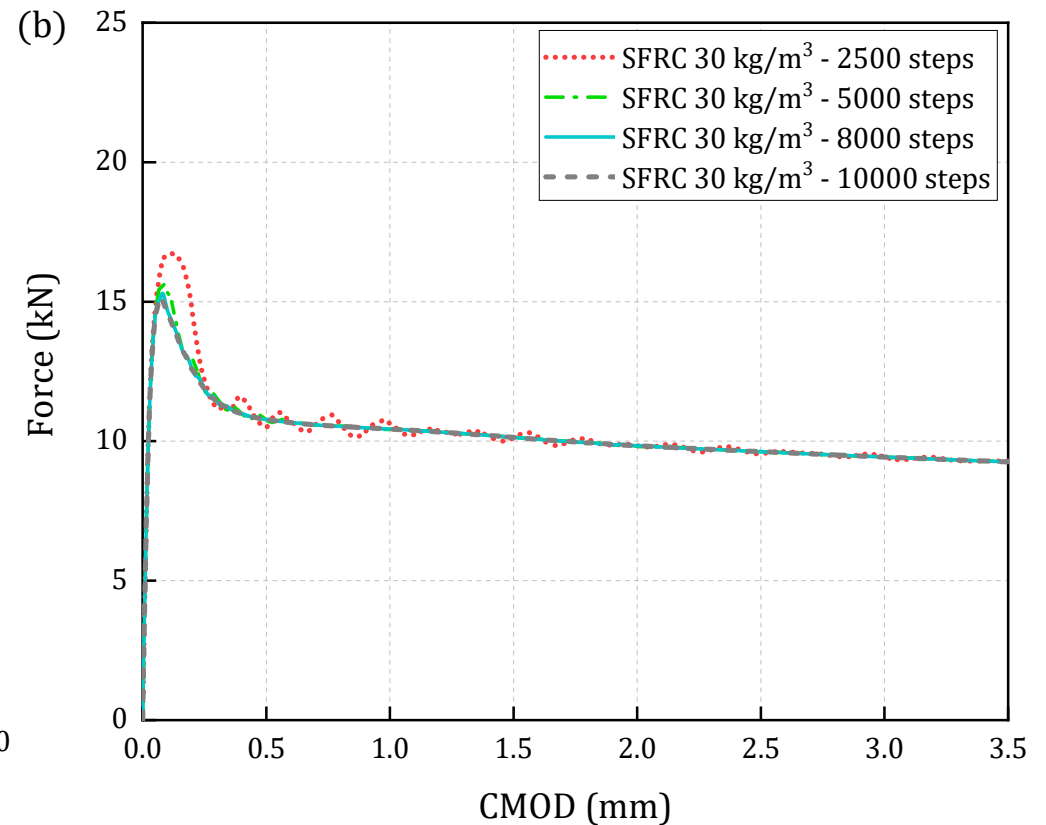
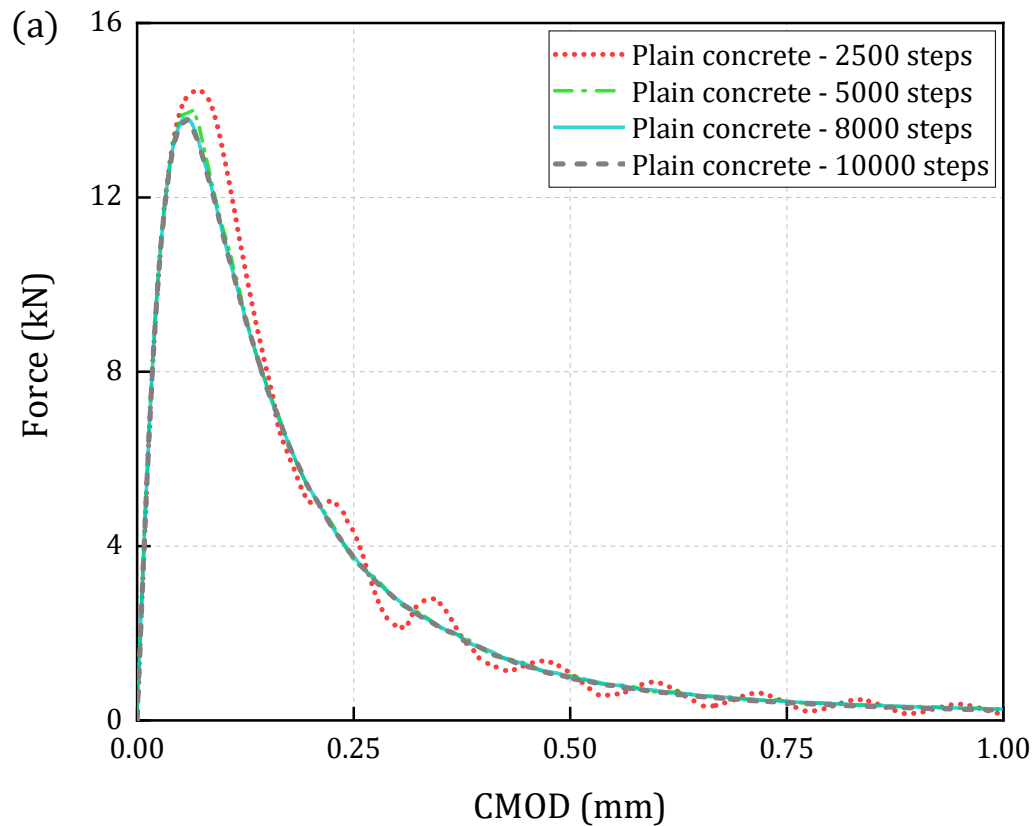
concrete-fiber interaction $\tau_{bmax} = 8.5 \text{ MPa}$, $\tau_{bf} = 4.5 \text{ MPa}$, $\alpha = 0.4$, $s_1 = 0.01 \text{ mm}$, $s_2 = 6.5 \text{ mm}$, $c_n = 10^3 \text{ MPa/mm}$ and $c_s = 10^6 \text{ MPa/mm}$.



3 Aplicações

Simulação numérica do ensaio de flexão de três pontos - EN 14651

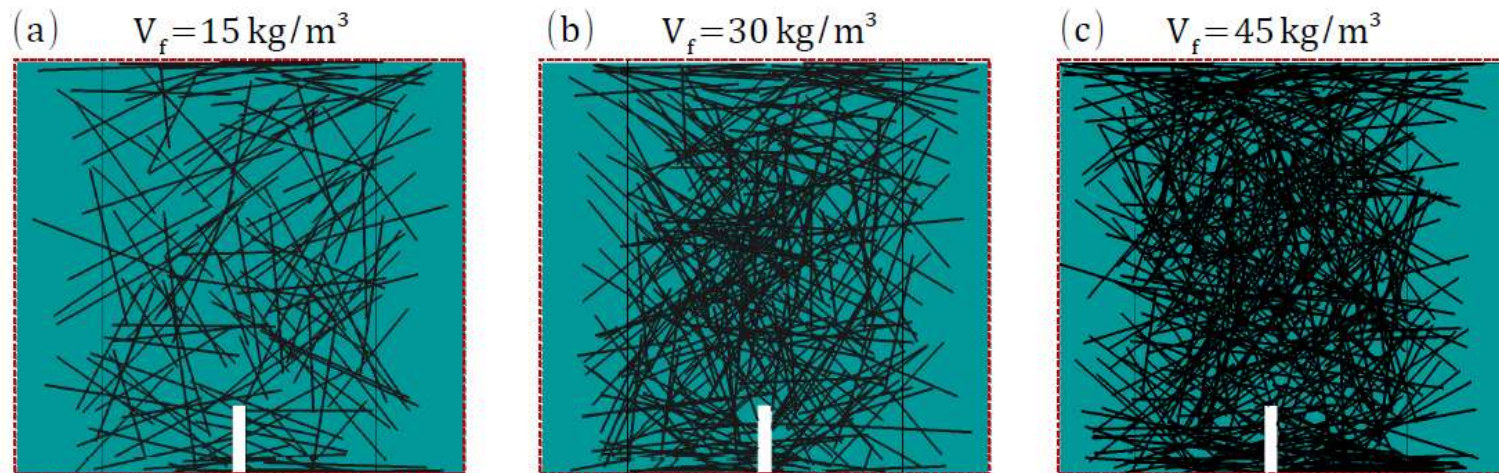
Estudo de convergência do esquema de integração Impl-Ex



3 Aplicações

Simulação numérica do ensaio de flexão de três pontos - EN 14651

Efeito do volume de fibra e da distribuição



Characteristic data of the finite element meshes.

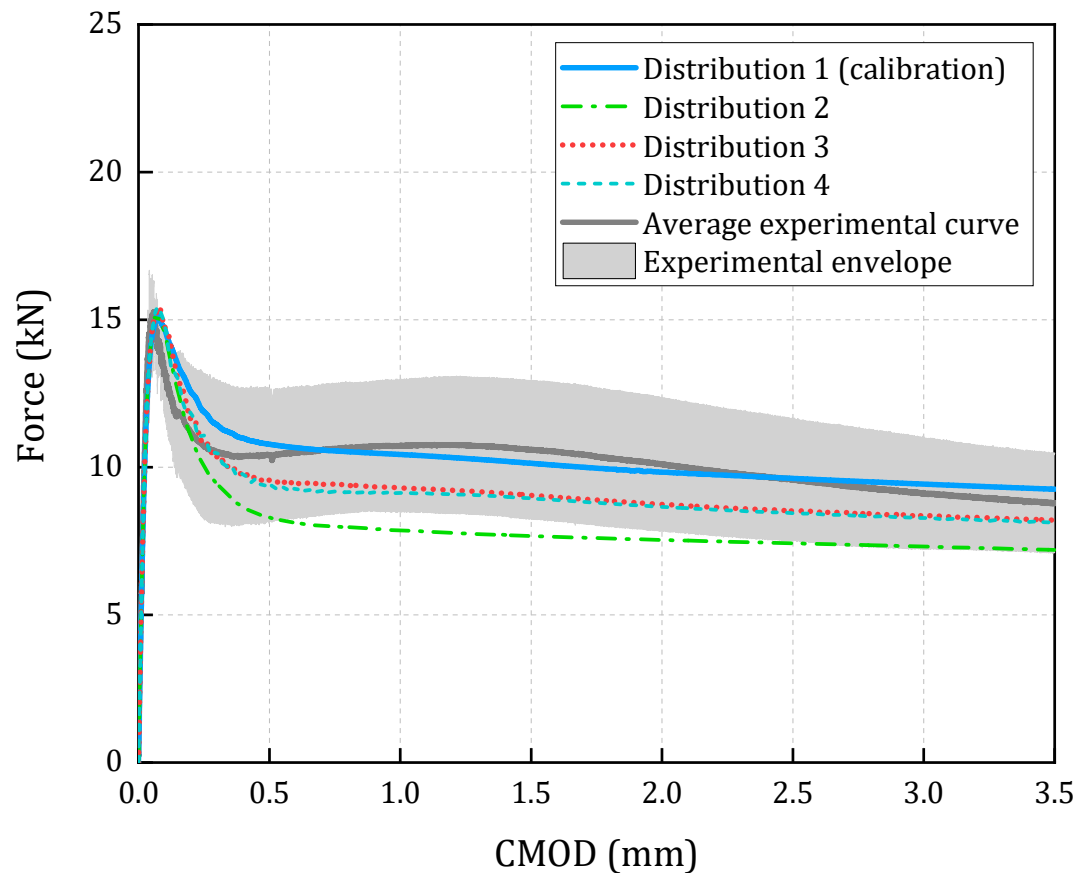
Fiber content V_f	Number of elements			
	two-noded trusses	three-noded triangular	four-noded triangular CFEs	total number of elements
15 kg/m ³	783	5173	953	6909
30 kg/m ³	1578	5173	1923	8674
45 kg/m ³	2380	5173	2885	10438

3 Aplicações

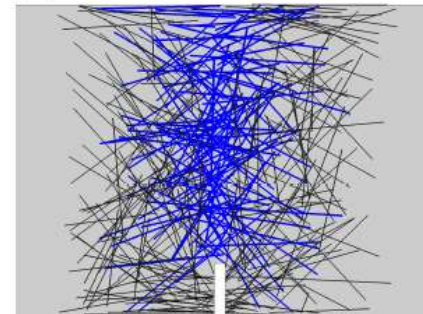
Simulação numérica do ensaio de flexão de três pontos - EN 14651

Efeito do volume de fibra e da distribuição

concrete-fiber interaction $\tau_{bmax} = 8.5 \text{ MPa}$, $\tau_{bf} = 4.5 \text{ MPa}$, $\alpha = 0.4$, $s_1 = 0.01 \text{ mm}$, $s_2 = 6.5 \text{ mm}$, $c_n = 10^3 \text{ MPa/mm}$ and $c_s = 10^6 \text{ MPa/mm}$.

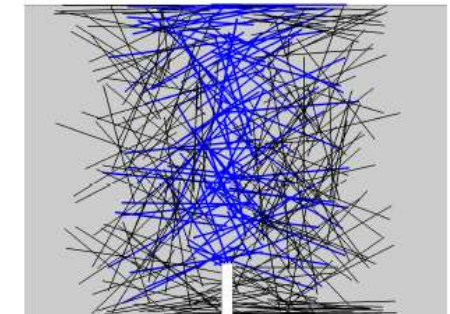


(a) Distribution 1



117 fibers

(b) Distribution 2

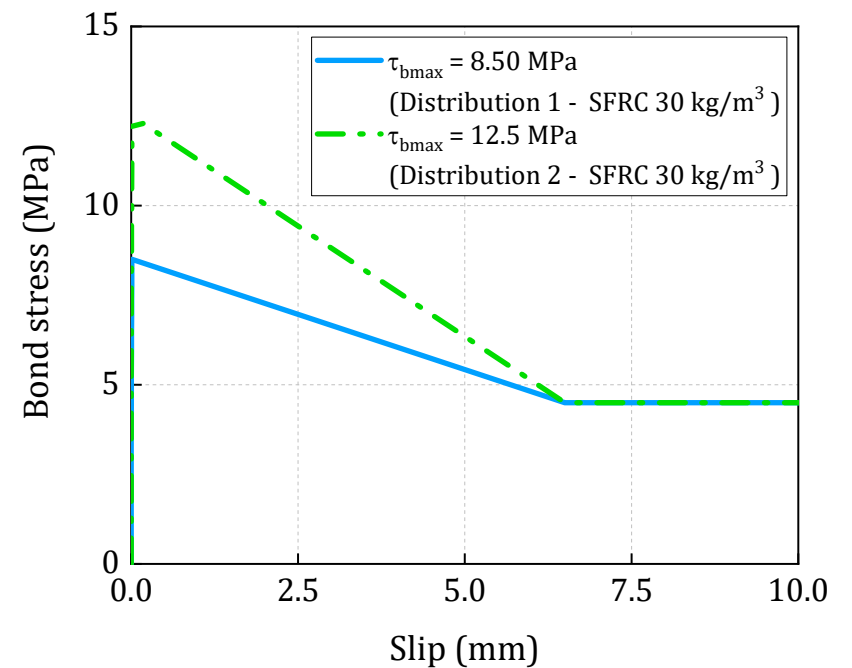
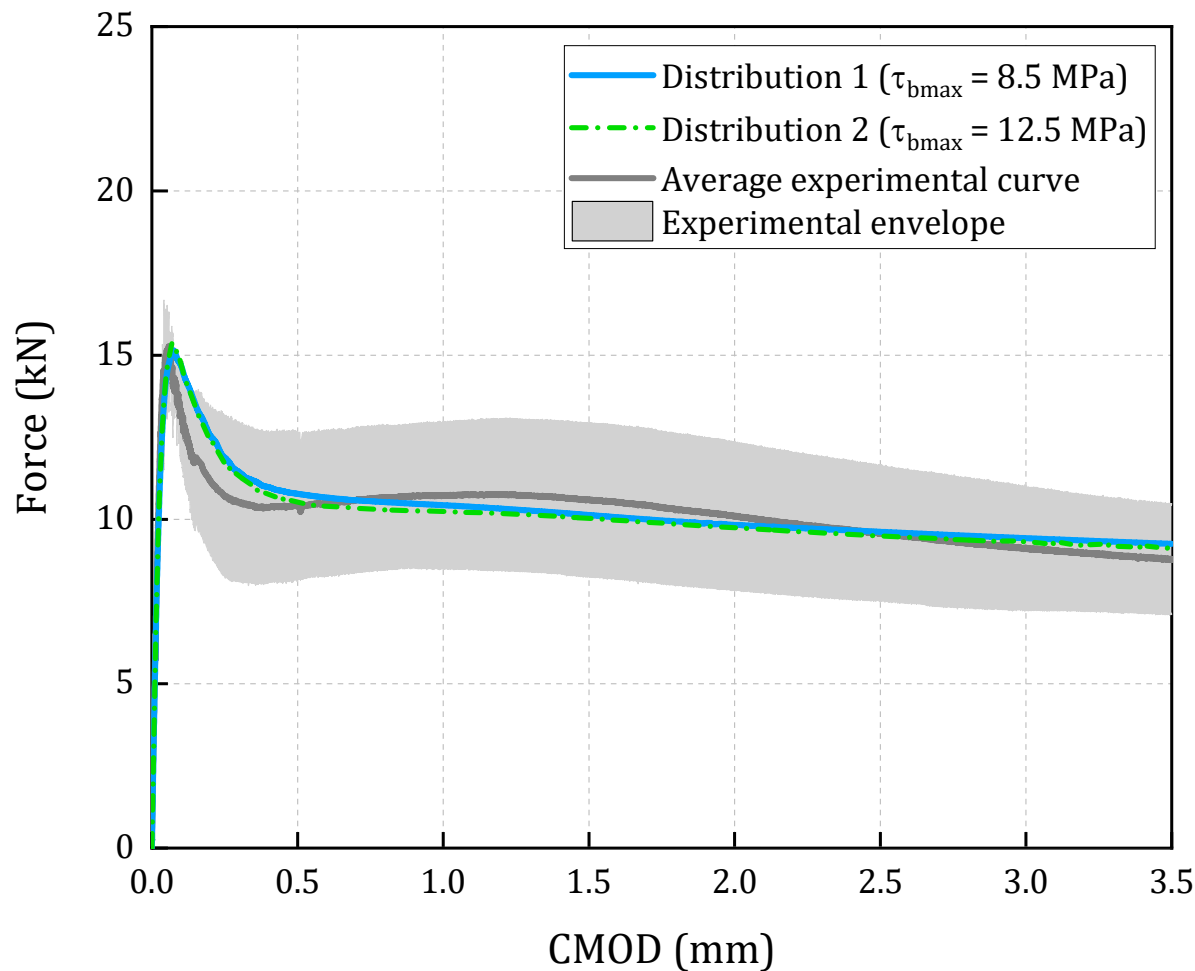


101 fibers

3 Aplicações

Simulação numérica do ensaio de flexão de três pontos - EN 14651

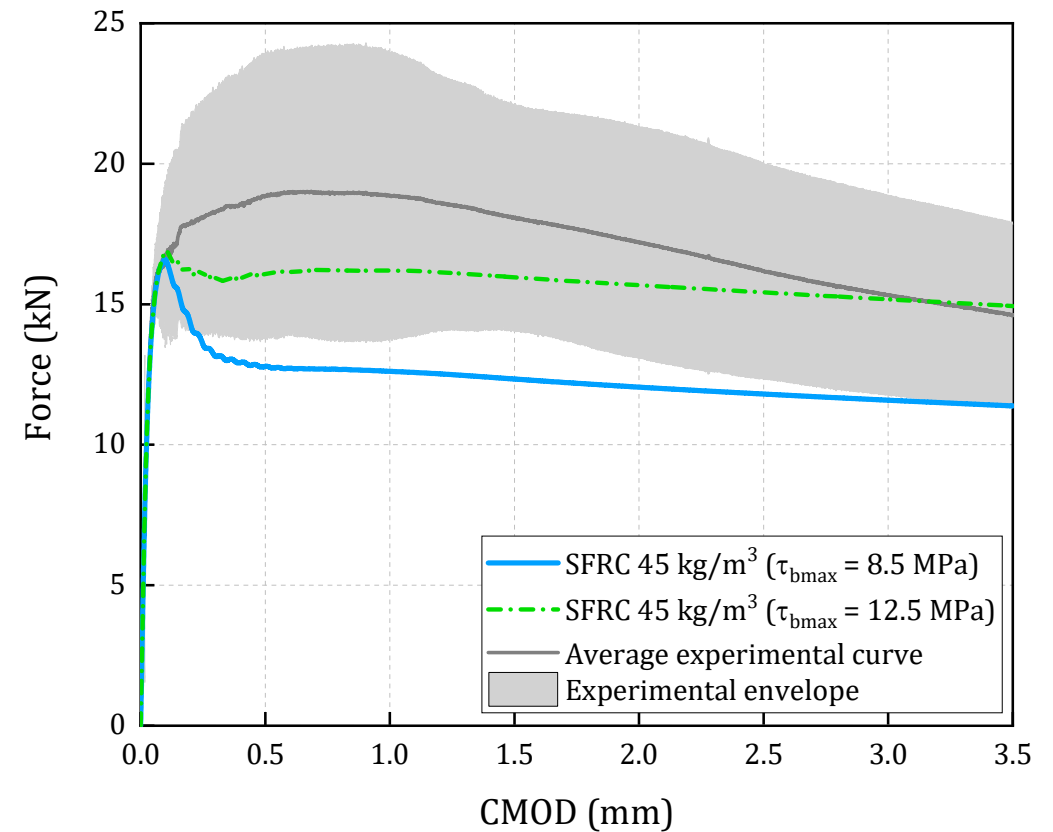
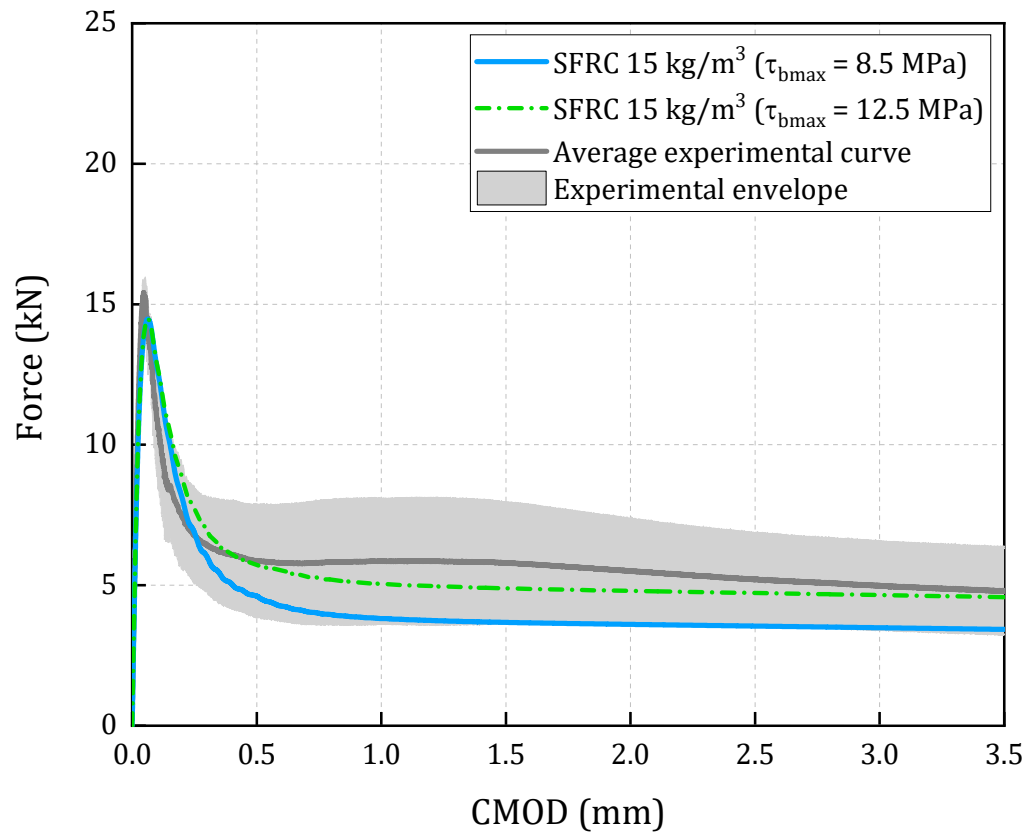
Efeito do volume de fibra e da distribuição



3 Aplicações

Simulação numérica do ensaio de flexão de três pontos - EN 14651

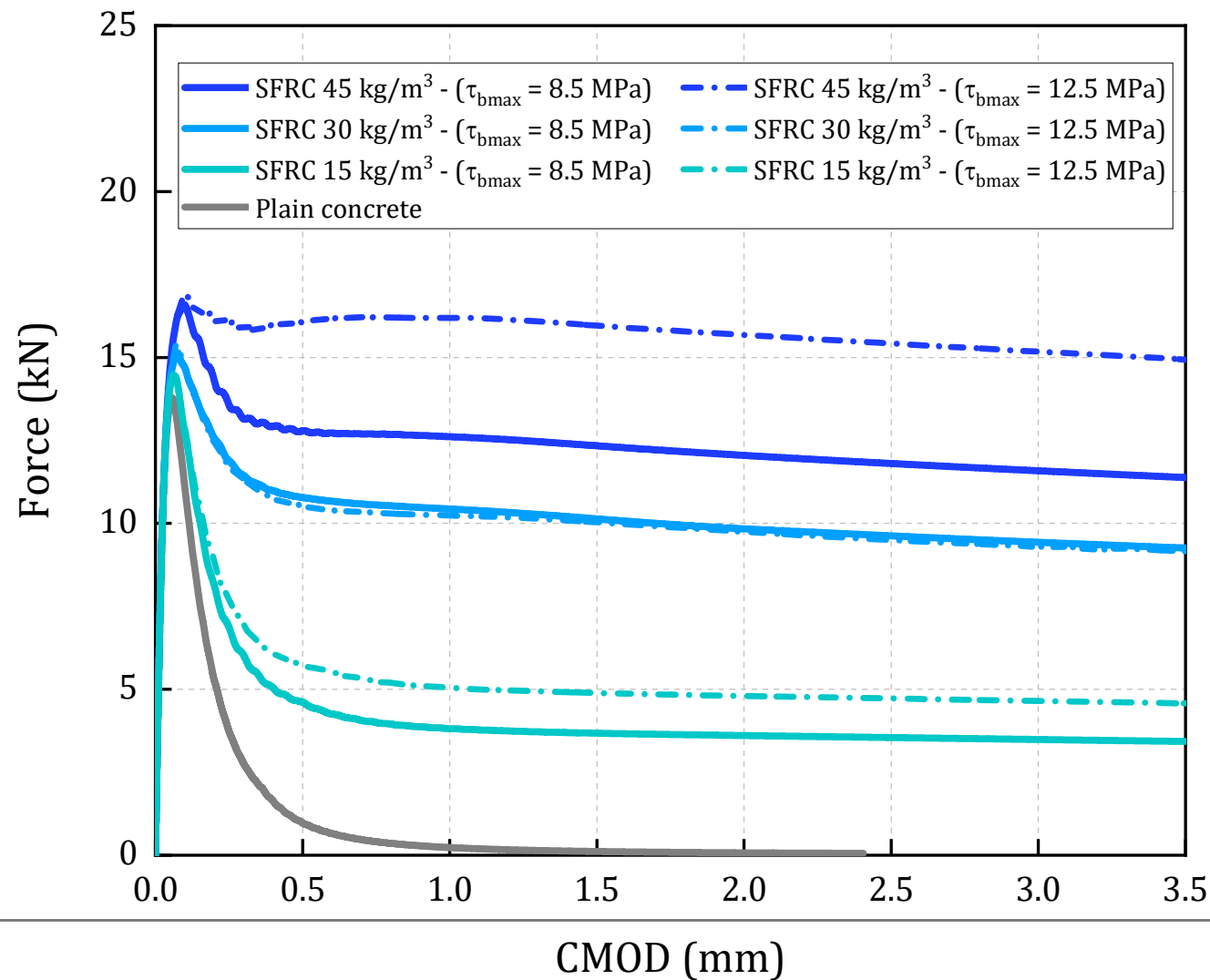
Efeito do volume de fibra e da distribuição



3 Aplicações

Simulação numérica do ensaio de flexão de três pontos - EN 14651

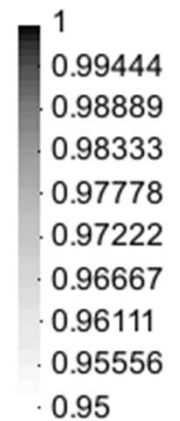
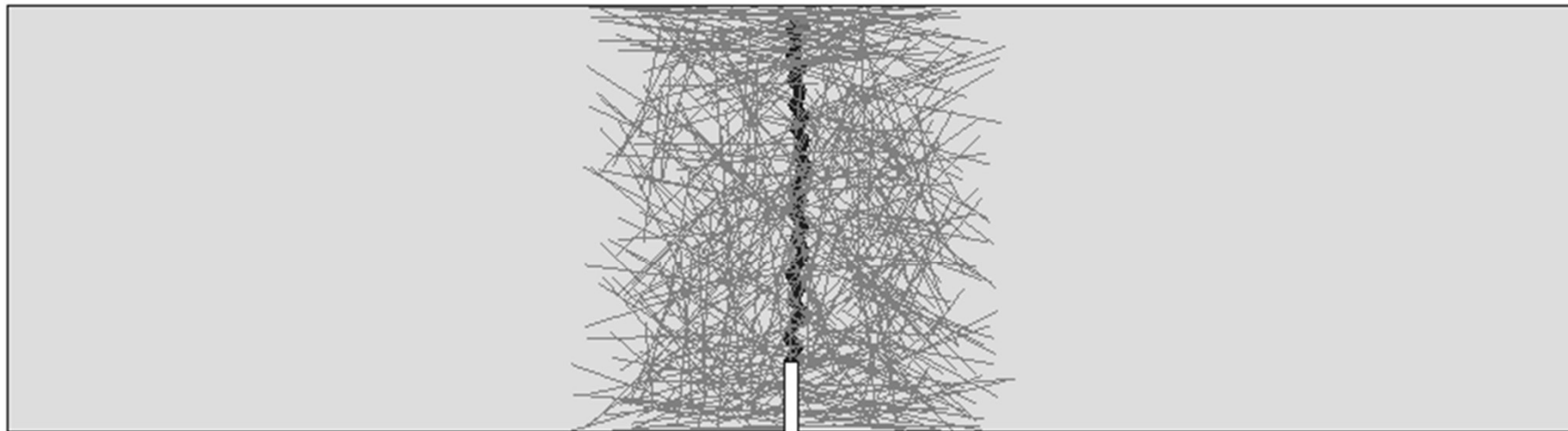
Efeito do volume de fibra e da distribuição



3 Aplicações

Simulação numérica do ensaio de flexão de três pontos - EN 14651

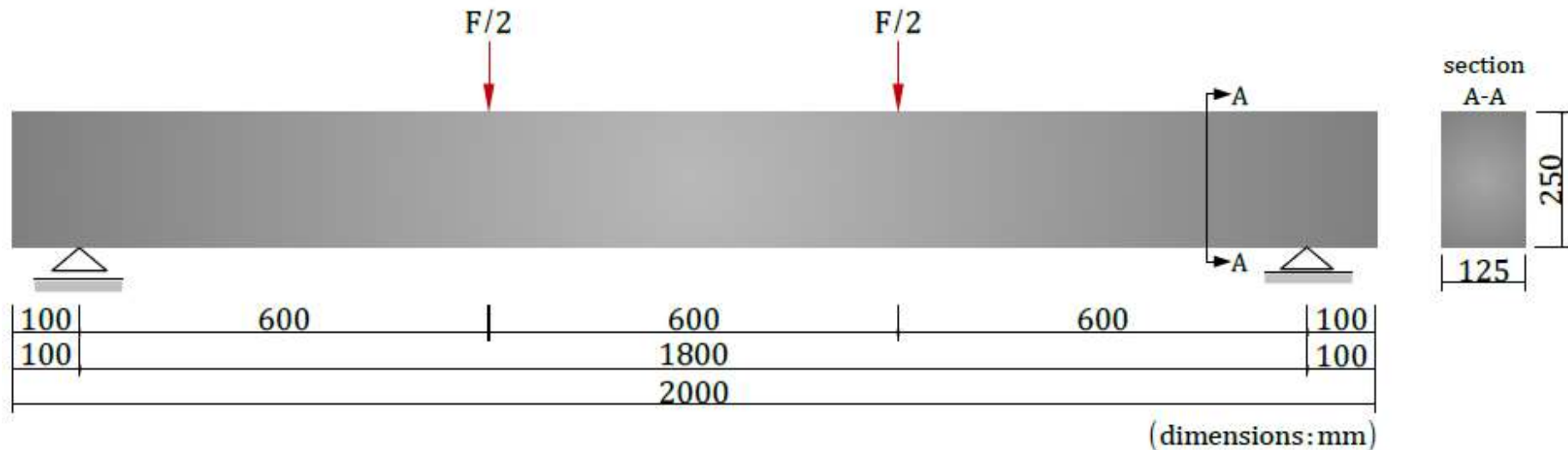
Processo de propagação da fissura



3 Aplicações

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

Dimensionamento de vigas de acordo com o MC2010



Mechanical properties of the conventional rebars adopted.

$$F = 123 \text{ kN}$$

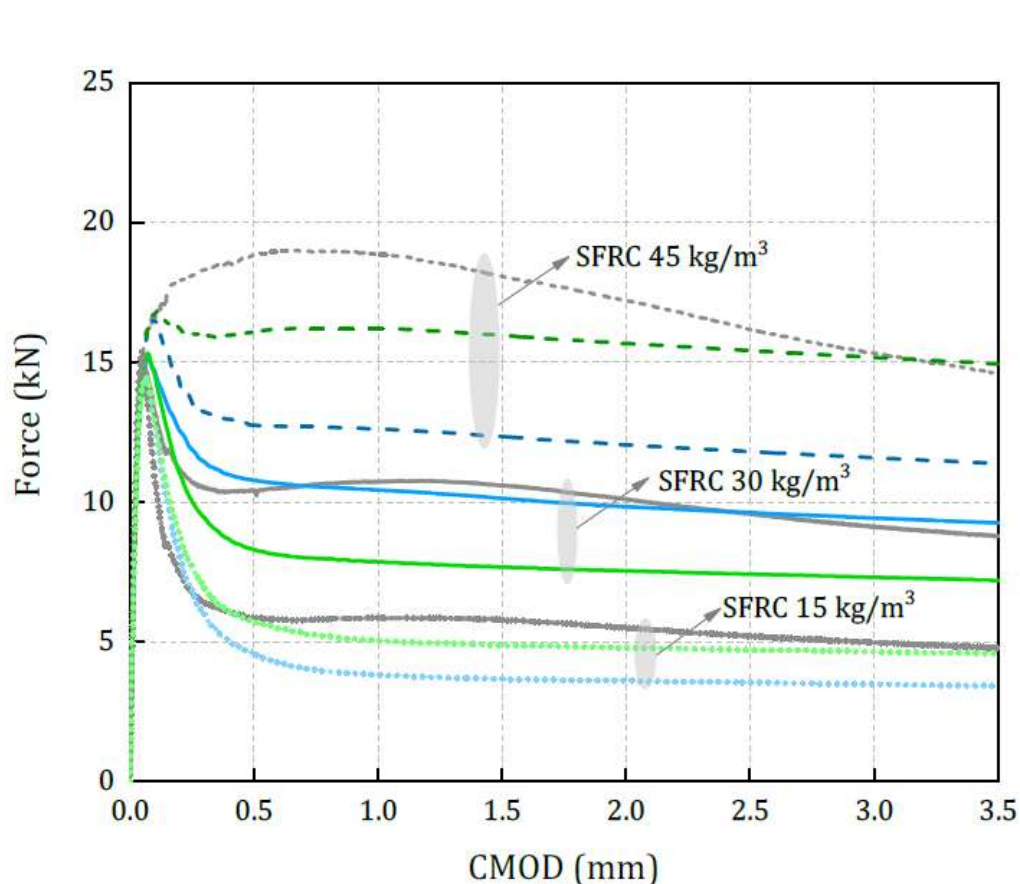
Yield strength f_y (for rebars with $\phi 5.0$)	600 MPa
Yield strength f_y (for all other rebars)	500 MPa
Young's modulus E_s	200 GPa

Aplicações

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

Dimensionamento de vigas de acordo com o MC2010

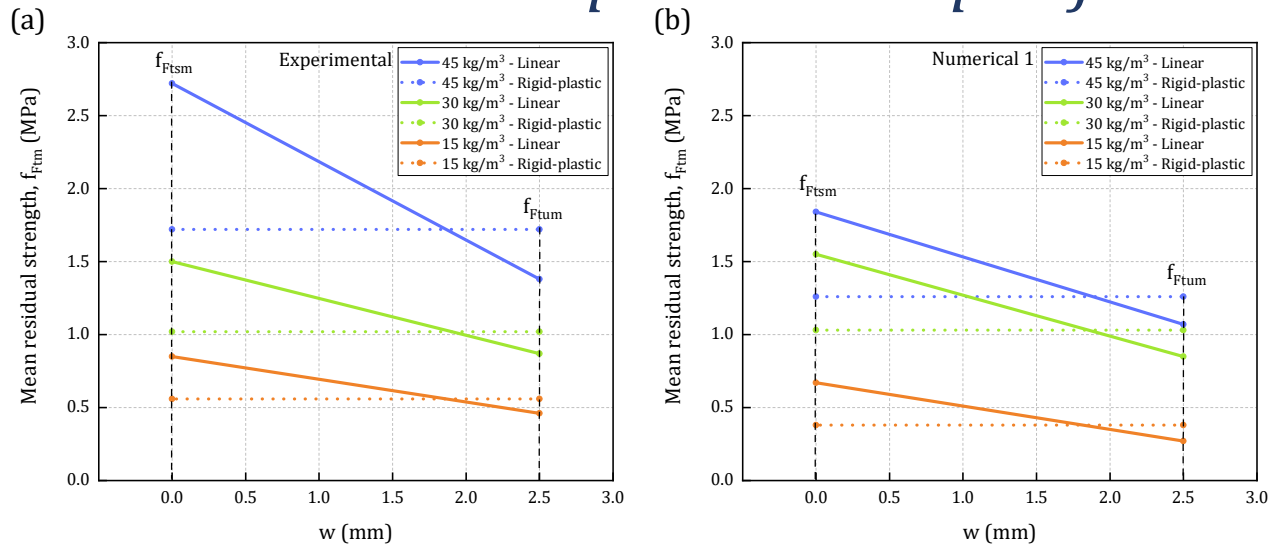
Comportamento pós-fissuração do SFRC



Numerical 1		Numerical 2		Experimental test	
---	SFRC 45 kg/m ³ ($\tau_{bmax} = 8.5$ MPa)	---	SFRC 45 kg/m ³ ($\tau_{bmax} = 12.5$ MPa)	---	SFRC 45 kg/m ³
---	SFRC 30 kg/m ³ ($\tau_{bmax} = 8.5$ MPa - distribution 1)	---	SFRC 30 kg/m ³ ($\tau_{bmax} = 8.5$ MPa - distribution 2)	---	SFRC 30 kg/m ³
---	SFRC 15 kg/m ³ ($\tau_{bmax} = 8.5$ MPa)	---	SFRC 15 kg/m ³ ($\tau_{bmax} = 12.5$ MPa)	---	SFRC 15 kg/m ³

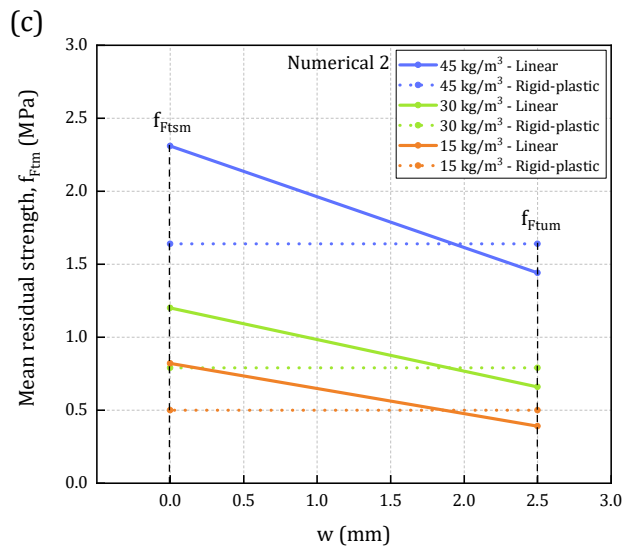
Results from	Fiber content (kg/m ³)	f_L (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R3} (MPa)	Classification
Experimental tests	15 kg/m ³	4.96	1.88	1.67	1.5b
	30 kg/m ³	4.84	3.34	3.07	3.0c
	45 kg/m ³	4.85	6.04	5.17	6.0c
Numerical 1	15 kg/m ³	4.63	1.48	1.13	1.5b
	30 kg/m ³	4.90	3.45	3.08	3.0c
	45 kg/m ³	5.31	4.09	3.78	4.0c
Numerical 2	15 kg/m ³	4.63	1.83	1.51	1.5b
	30 kg/m ³	4.90	2.66	2.38	3.0c
	45 kg/m ³	5.41	5.13	4.93	5.0c

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

Dimensionamento de vigas de acordo com o MC2010*Comportamento pós-fissuração do SFRC*

Residual strengths for rigid-plastic and linear models: fiber contents of 15 kg/m³, 30 kg/m³ and 45 kg/m³

Results from	Fiber content (kg/m ³)	Rigid-plastic		Linear
		f_{Ftu} (MPa)	f_{Fts} (MPa)	f_{Ftu} (MPa)
Experimental tests	15 kg/m ³	0.56	0.85	0.46
	30 kg/m ³	1.02	1.50	0.87
	45 kg/m ³	1.72	2.72	1.38
Numerical 1	15 kg/m ³	0.38	0.67	0.27
	30 kg/m ³	1.03	1.55	0.85
Numerical 2	15 kg/m ³	0.50	0.82	0.39
	30 kg/m ³	0.79	1.20	0.66
	45 kg/m ³	1.64	2.31	1.44



3

Aplicações

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

Dimensionamento de vigas de acordo com o MC2010

Estado Limite Último

Flexão

f_{Ftu} based on	Beam	Rigid-plastic		Linear model		Adopted
		A_s (cm ²)	$\Delta\%$	A_s (cm ²)	$\Delta\%$	
-	RC	$A_s = 4.0 \text{ cm}^2$				$2 \cdot \phi_{16.0}$ (4.0 cm ²)
Experimental tests	RC-SFRC 15 kg/m ³					$2 \cdot \phi_{16.0}$ (4.0 cm ²)
	RC-SFRC 30 kg/m ³	3.67	8%	3.71	7%	
	RC-SFRC 45 kg/m ³	3.45	14%	3.56	11%	
Numerical 1	RC-SFRC 15 kg/m ³					$2 \cdot \phi_{16.0}$ (4.0 cm ²)
	RC-SFRC 30 kg/m ³	3.66	9%	3.72	7%	
	RC-SFRC 45 kg/m ³	3.59	10%	3.65	9%	
Numerical 2	RC-SFRC 15 kg/m ³					$2 \cdot \phi_{16.0}$ (4.0 cm ²)
	RC-SFRC 30 kg/m ³	3.74	6%	3.78	6%	
	RC-SFRC 45 kg/m ³	3.48	13%	3.54	12%	

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

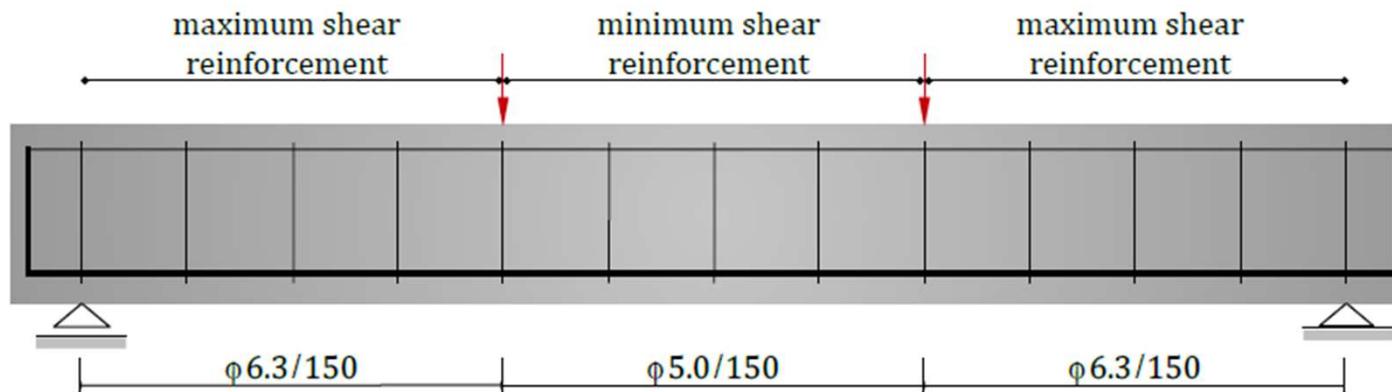
and

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

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

Dimensionamento de vigas de acordo com o MC2010

Estado Limite Último



f_{Ftu} based on	Beam	Max	Min	$\Delta\%$
-	RC	$\phi 6.3/150$	$\phi 5.0/150$	
Experimental tests	RC-SFRC 15 kg/m ³	-	-	-
	RC-SFRC 30 kg/m ³	$\phi 5.0/150$	steel fibers	47%
	RC-SFRC 45 kg/m ³	steel fibers	steel fibers	100%
Numerical 1	RC-SFRC 15 kg/m ³	-	-	-
	RC-SFRC 30 kg/m ³	$\phi 5.0/150$	steel fibers	47%
	RC-SFRC 45 kg/m ³	steel fibers	steel fibers	100%
Numerical 2	RC-SFRC 15 kg/m ³	-	-	-
	RC-SFRC 30 kg/m ³	$\phi 5.0/150$	steel fibers	47%
	RC-SFRC 45 kg/m ³	steel fibers	steel fibers	100%

Cisalhamento

3

Aplicações

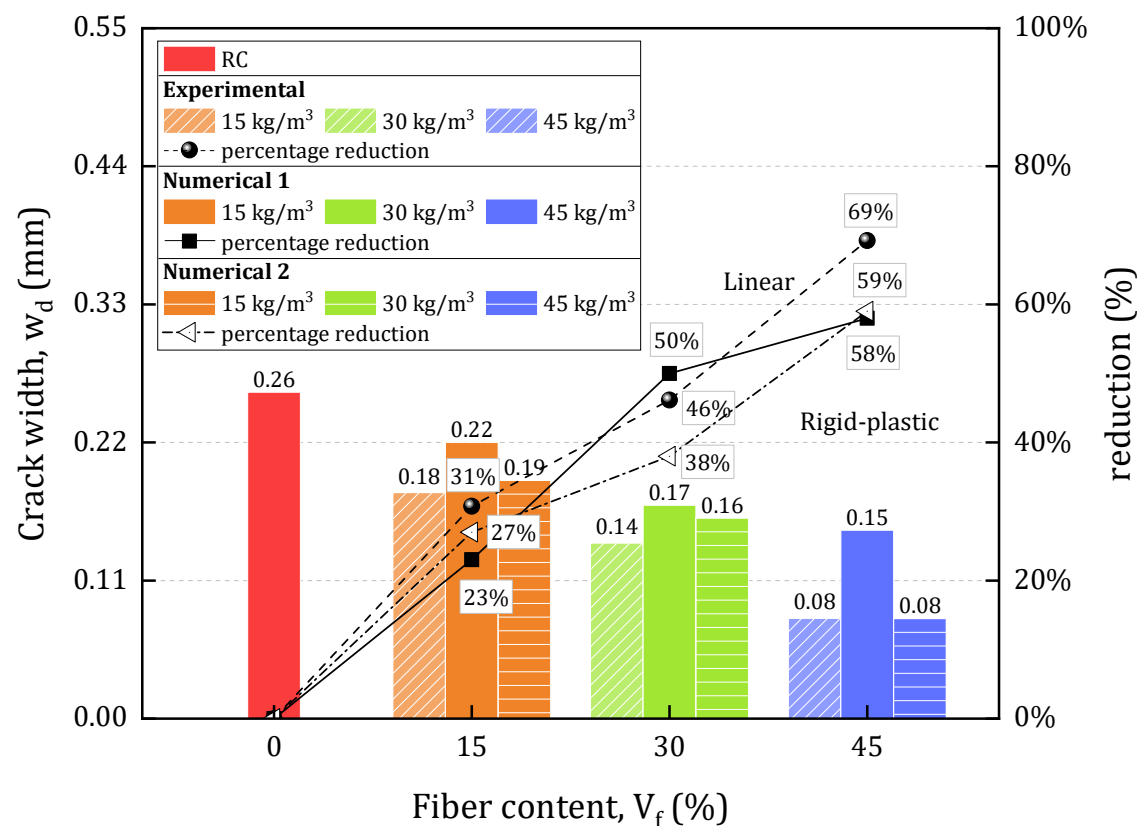
Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

Dimensionamento de vigas de acordo com o MC2010

Estado Limite de Serviço

Abertura de fissura

Reference values	Beam	w_d (mm)	$\Delta\%$
-	RC	0.26	-
Experimental tests	RC-SFRC 15 kg/m ³	0.18	31%
	RC-SFRC 30 kg/m ³	0.14	46%
	RC-SFRC 45 kg/m ³	0.08	69%
Numerical 1	RC-SFRC 15 kg/m ³	0.20	23%
	RC-SFRC 30 kg/m ³	0.13	50%
	RC-SFRC 45 kg/m ³	0.11	58%
Numerical 2	RC-SFRC 15 kg/m ³	0.19	27%
	RC-SFRC 30 kg/m ³	0.16	38%
	RC-SFRC 45 kg/m ³	0.08	69%



3 Aplicações

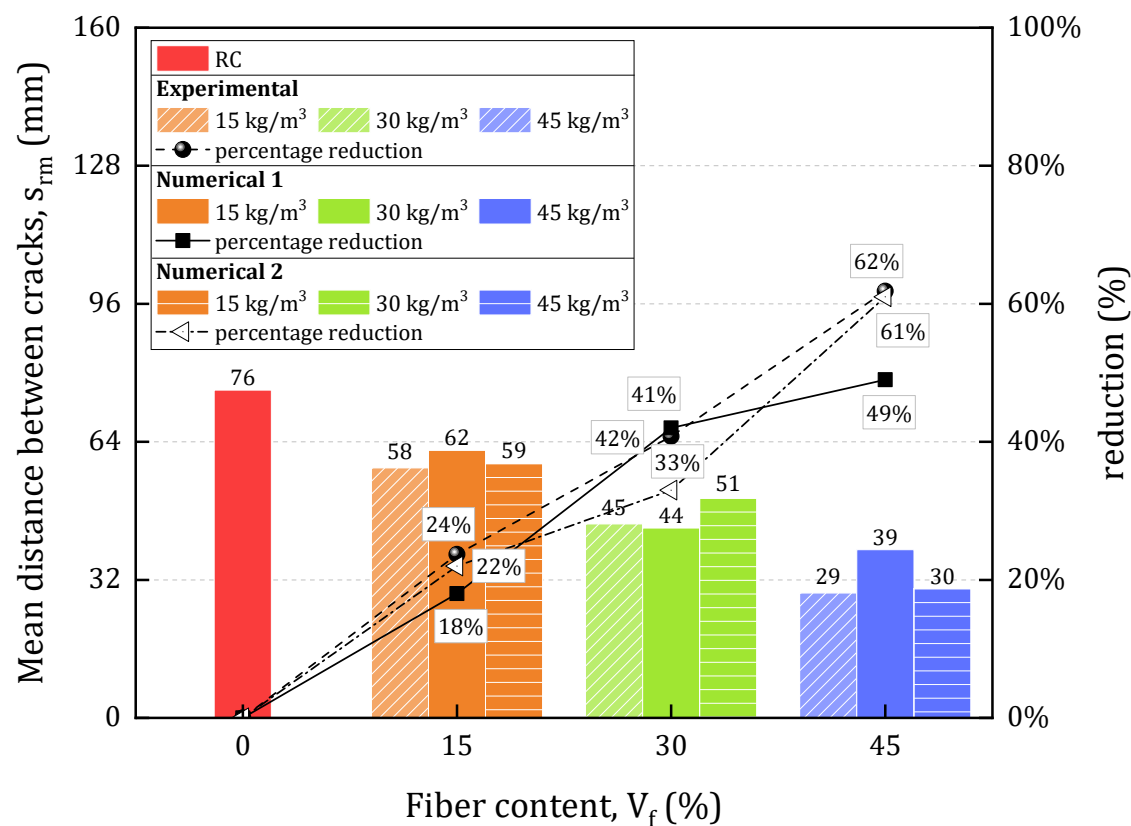
Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

Dimensionamento de vigas de acordo com o MC2010

Estado Limite de Serviço

Distância média entre fissuras

Reference values	Beam	s_{rm} (mm)	$\Delta\%$
-	RC	76	-
Experimental tests	RC-SFRC 15 kg/m ³	58	24%
	RC-SFRC 30 kg/m ³	45	41%
	RC-SFRC 45 kg/m ³	29	62%
Numerical 1	RC-SFRC 15 kg/m ³	62	18%
	RC-SFRC 30 kg/m ³	44	42%
	RC-SFRC 45 kg/m ³	39	49%
Numerical 2	RC-SFRC 15 kg/m ³	59	22%
	RC-SFRC 30 kg/m ³	51	33%
	RC-SFRC 45 kg/m ³	30	61%



3 Aplicações

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

Dimensionamento de vigas de acordo com o MC2010

Serviceability Limit State (SLS)

Deflexão

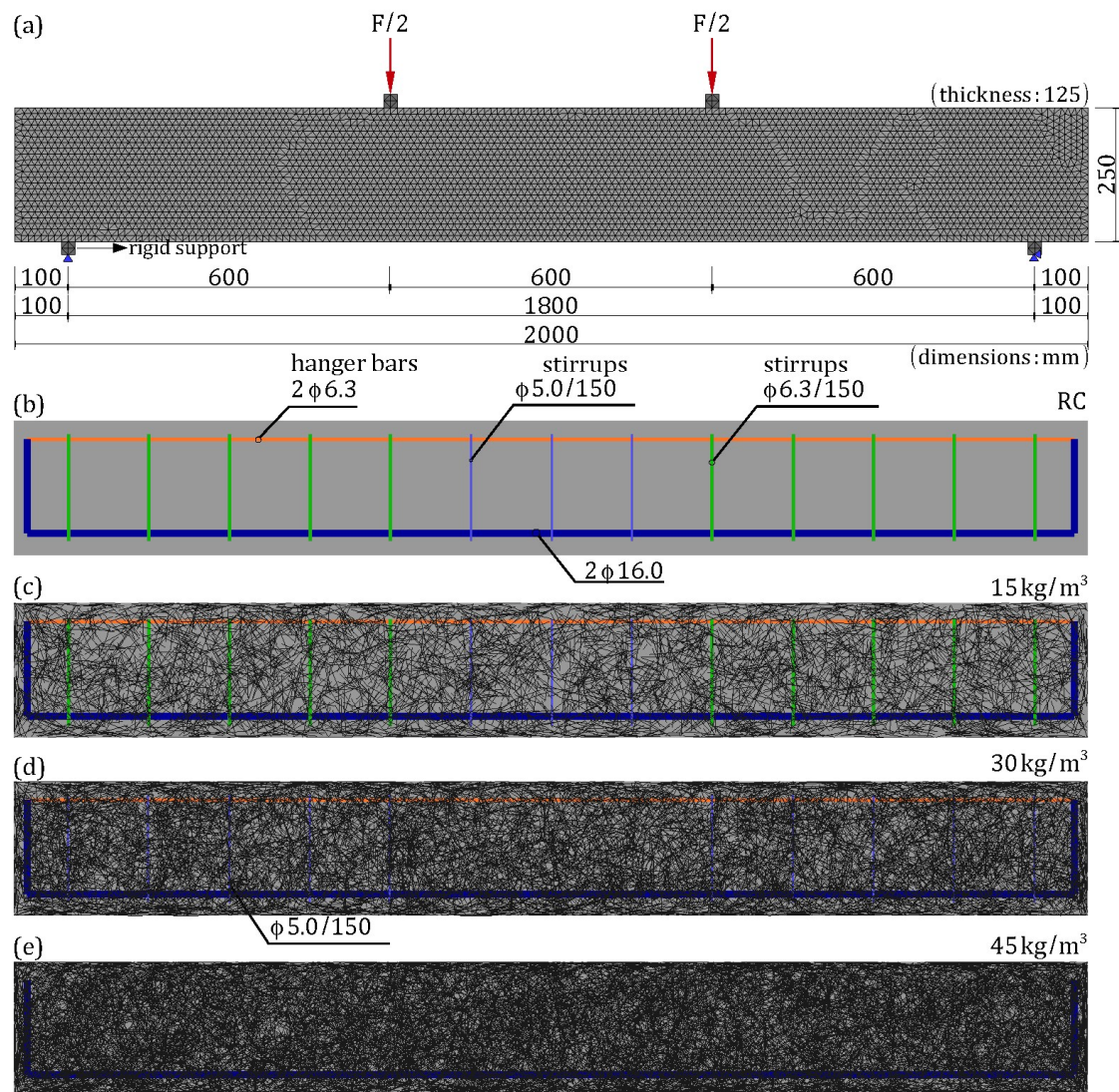
Reference values	Beam	δ_{SLS} (mm)	$\Delta\%$
-	RC	4.31	
Experimental tests	RC-SFRC 15 kg/m ³	4.03	6%
	RC-SFRC 30 kg/m ³	3.80	12%
	RC-SFRC 45 kg/m ³	3.41	21%
Numerical 1	RC-SFRC 15 kg/m ³	4.09	5%
	RC-SFRC 30 kg/m ³	3.78	12%
	RC-SFRC 45 kg/m ³	3.69	14%
Numerical 2	RC-SFRC 15 kg/m ³	4.03	6%
	RC-SFRC 30 kg/m ³	3.91	9%
	RC-SFRC 45 kg/m ³	3.54	18%

$$\delta_{lim} = 7.2 \text{ mm}$$

3

Aplicações

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

Simulação numérica via MEF

3

Aplicações

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

Simulação numérica via MEF

RC beam



Fator de escala: 3

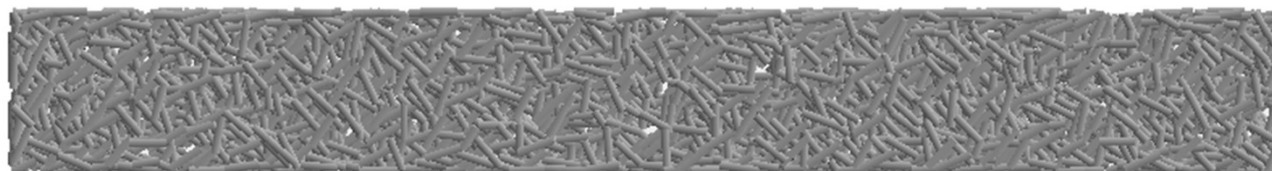
3

Aplicações

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

Simulação numérica via MEF

RC-SFRC 15kg/m³



Fator de escala: 3

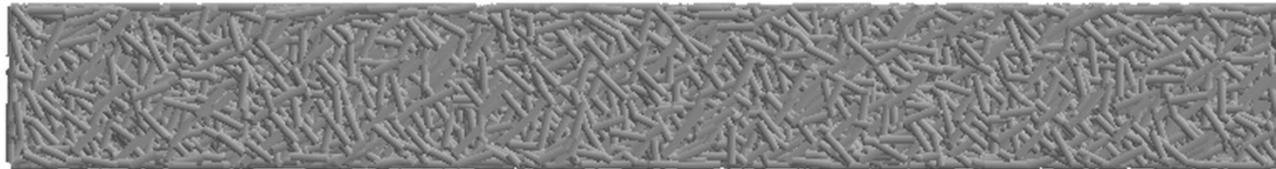
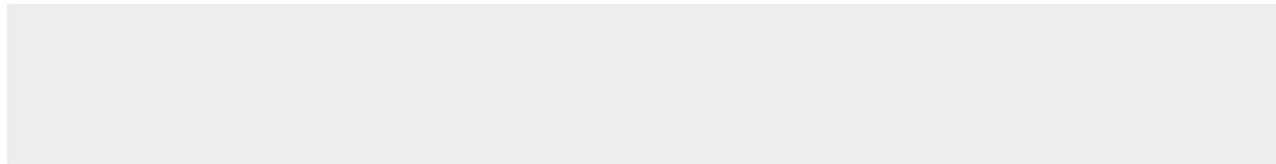
3

Aplicações

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

Simulação numérica via MEF

RC-SFRC 30kg/m³



Fator de escala: 3

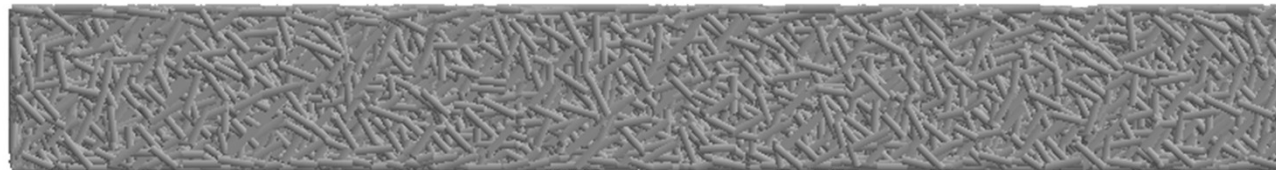
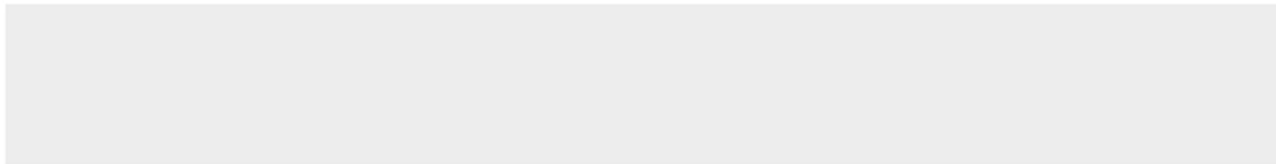
3

Aplicações

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

Simulação numérica via MEF

RC-SFRC 45kg/m³

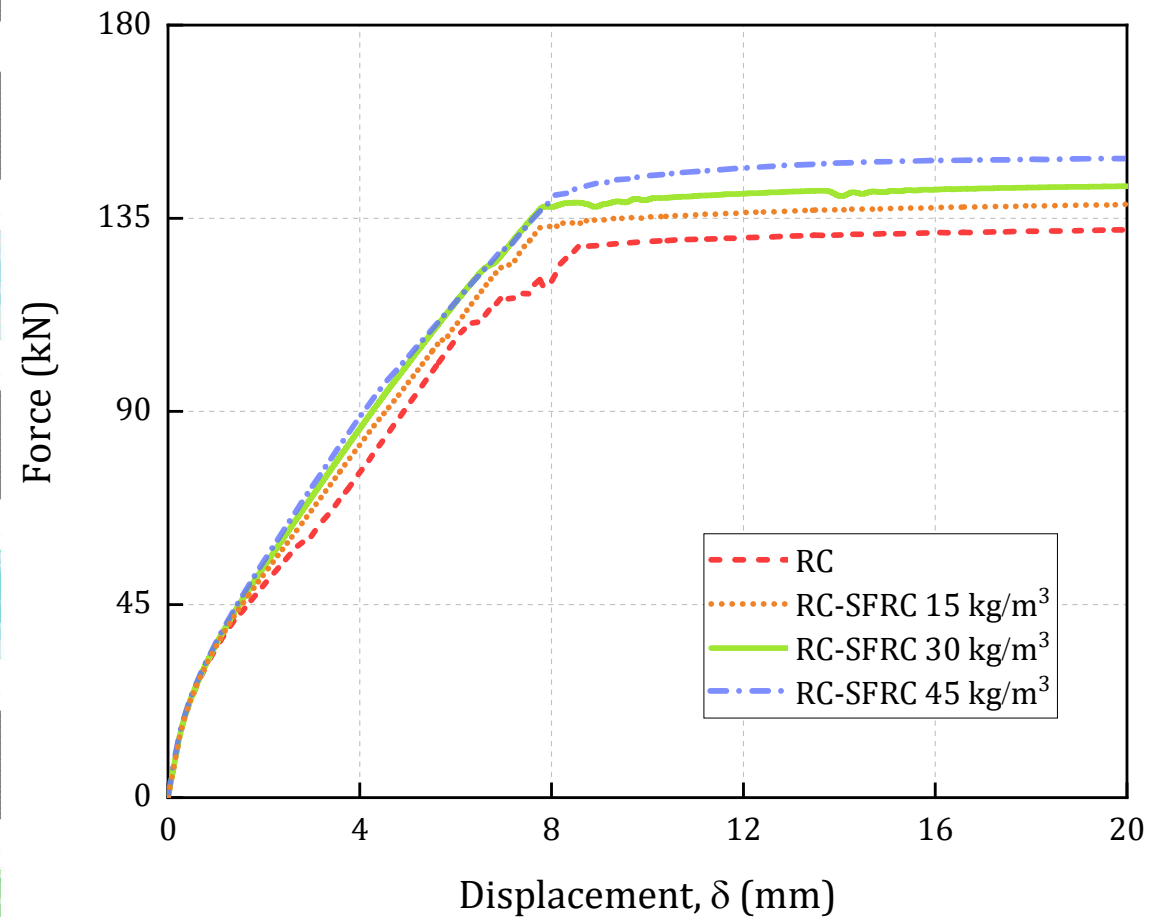
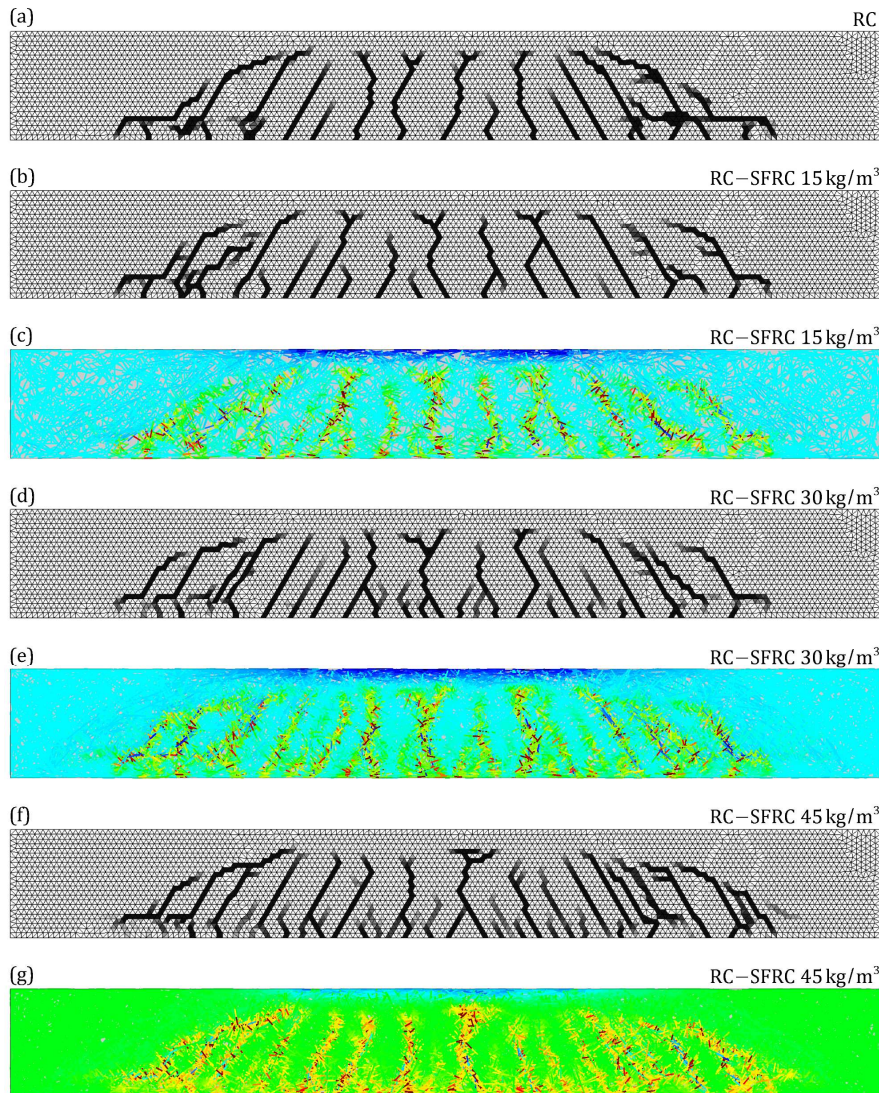


Fator de escala: 3

3

Aplicações

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

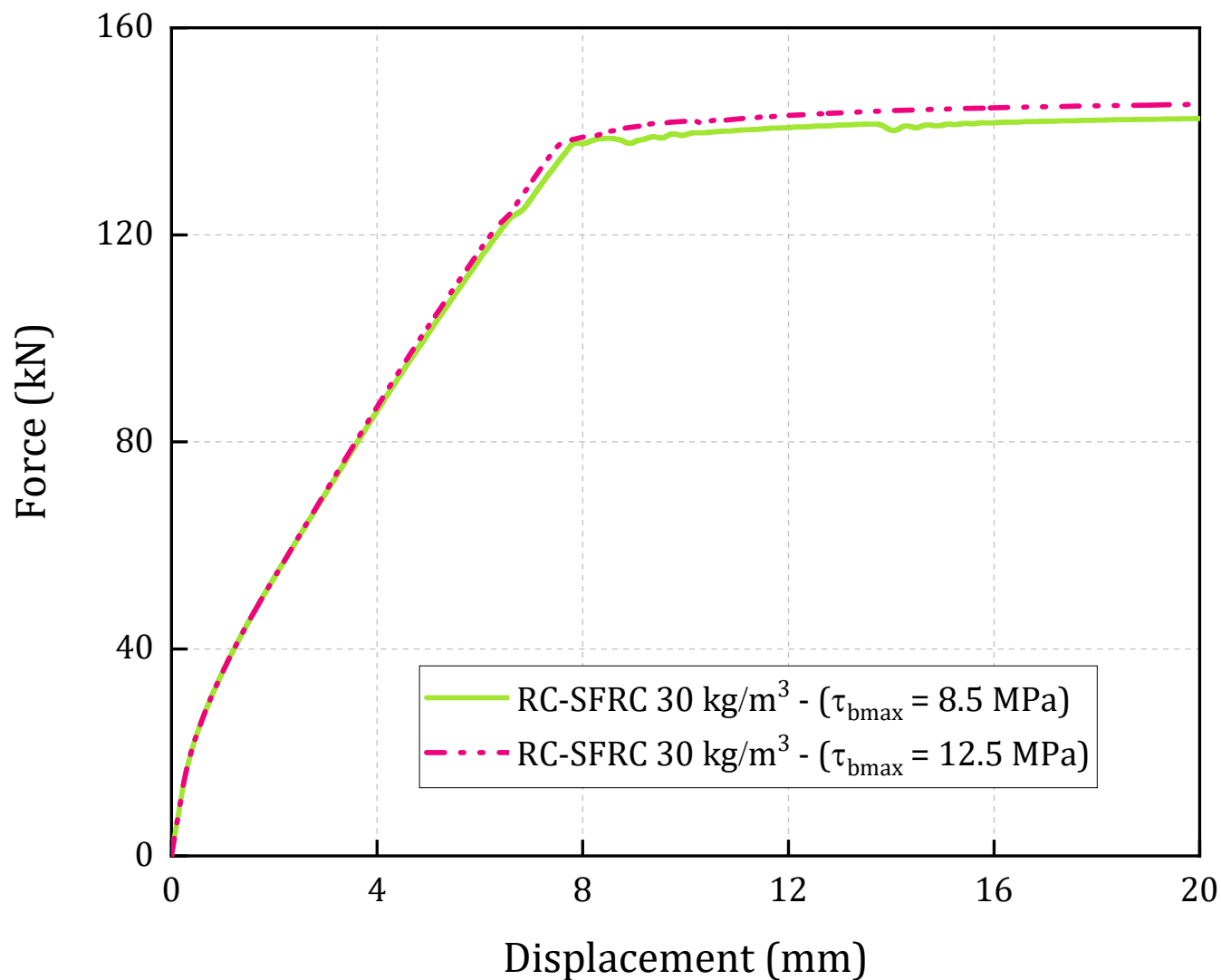
Simulação numérica via MEF

3

Aplicações

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

Simulação numérica via MEF

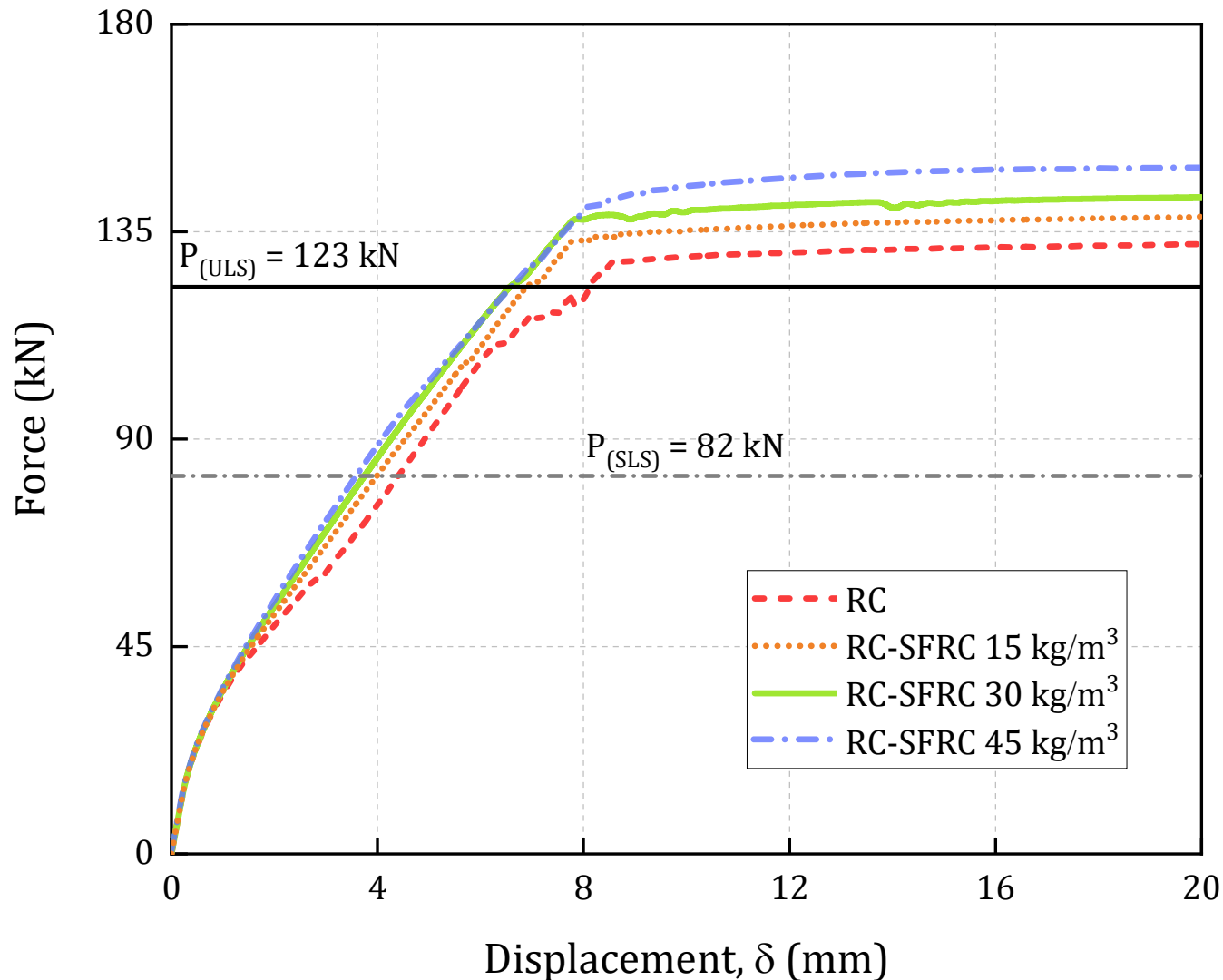


3

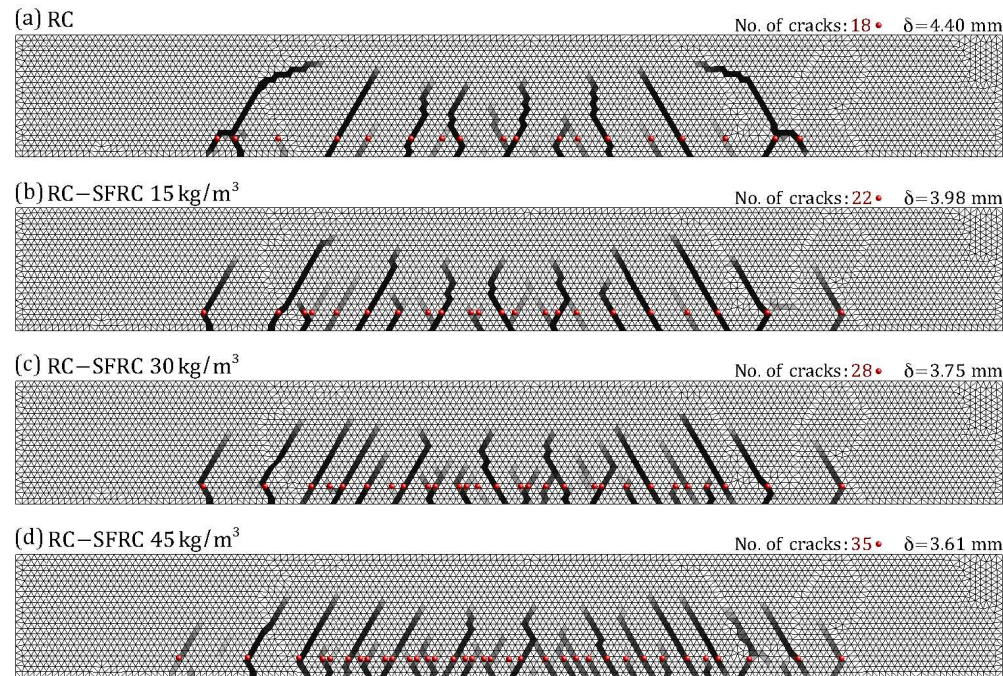
Aplicações

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

fib Model Code 2010 x análises numéricas



Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

fib Model Code 2010 x análises numéricas

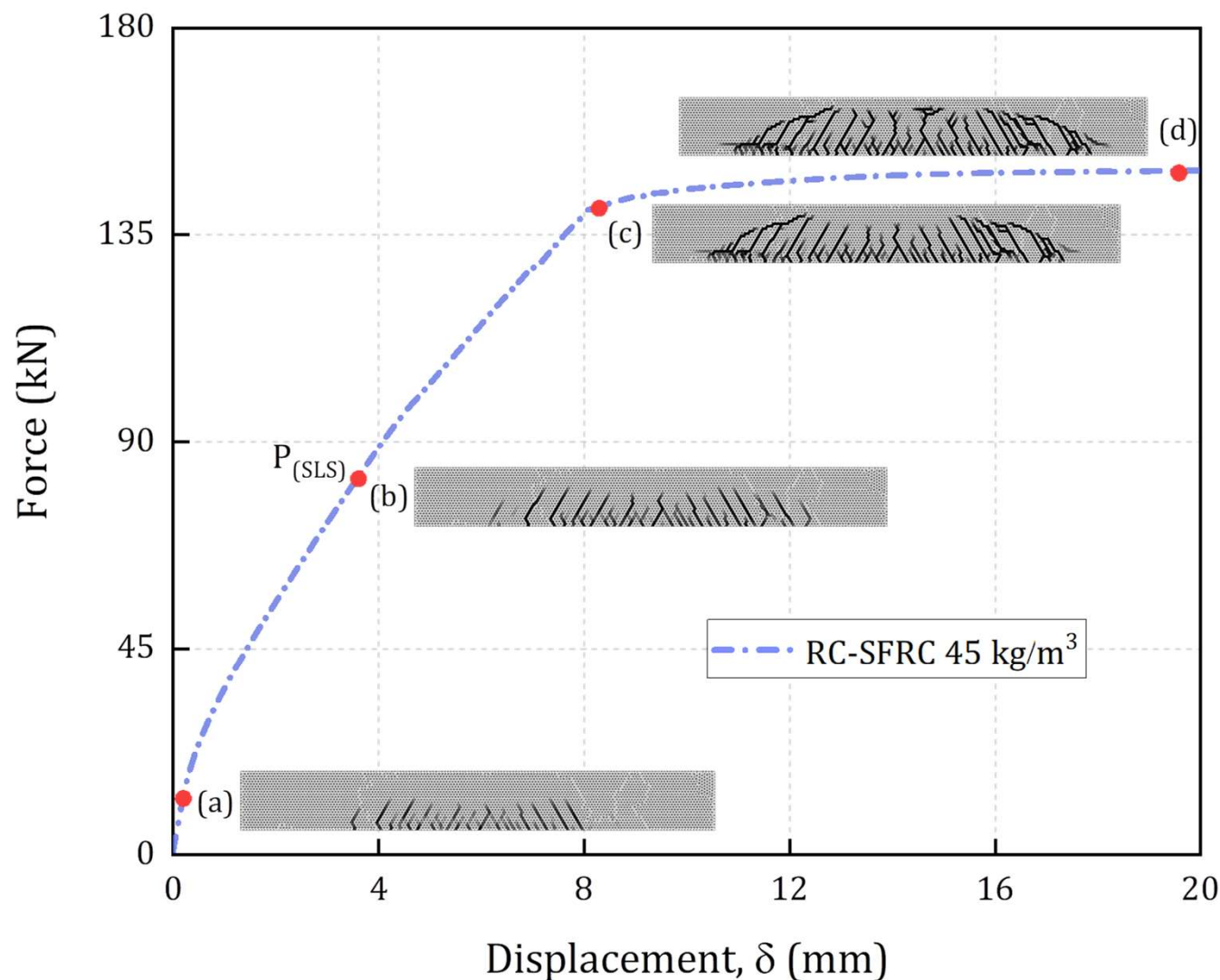
Beam	w_{num} (mm)	w_{MC2010} (mm)	$s_{rm,num}$ (mm)	$s_{rm,MC2010}$ (mm)	$\delta_{SLS,num}$ (mm)	$\delta_{SLS,MC2010}$ (mm)
RC	0.34	0.26	69	76	4.40	4.31
RC-SFRC 15 kg/m ³	0.24	0.18	62	58	3.98	4.03
RC-SFRC 30 kg/m ³	0.12	0.14	48	45	3.75	3.80
RC-SFRC 45 kg/m ³	0.10	0.08	38	29	3.61	3.41

3

Aplicações

Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

fib Model Code 2010 x análises numéricas



4

Conclusões

4

Conclusões

- Os resultados mostraram que o uso desta abordagem numérica é muito promissora para ser empregado na:
 - Simulação do ensaio de caracterização EN 14651 (2005);
 - Simulação de vigas de RC-SFRC.
 - Informações adicionais, como padrão de fissura, curvas de carga versus deslocamento, modo de falha e tensões nos reforços (fibras e amaduras convencionais)
 - Os resultados obtidos nestas análises podem contribuir para melhor compreender os efeitos dos diferentes aspectos que envolvem o processo de falha do SFRC.
 - Utilização da abordagem numérica para extrapolar as condições consideradas em laboratório e contribuir no projeto de elementos estruturais RC-SFRC, visando otimizar soluções estruturais.
-