

# **Concreto com fibras para finalidades estruturais**

Antonio Figueiredo

# Concreto – concreto armado – concreto com fibras

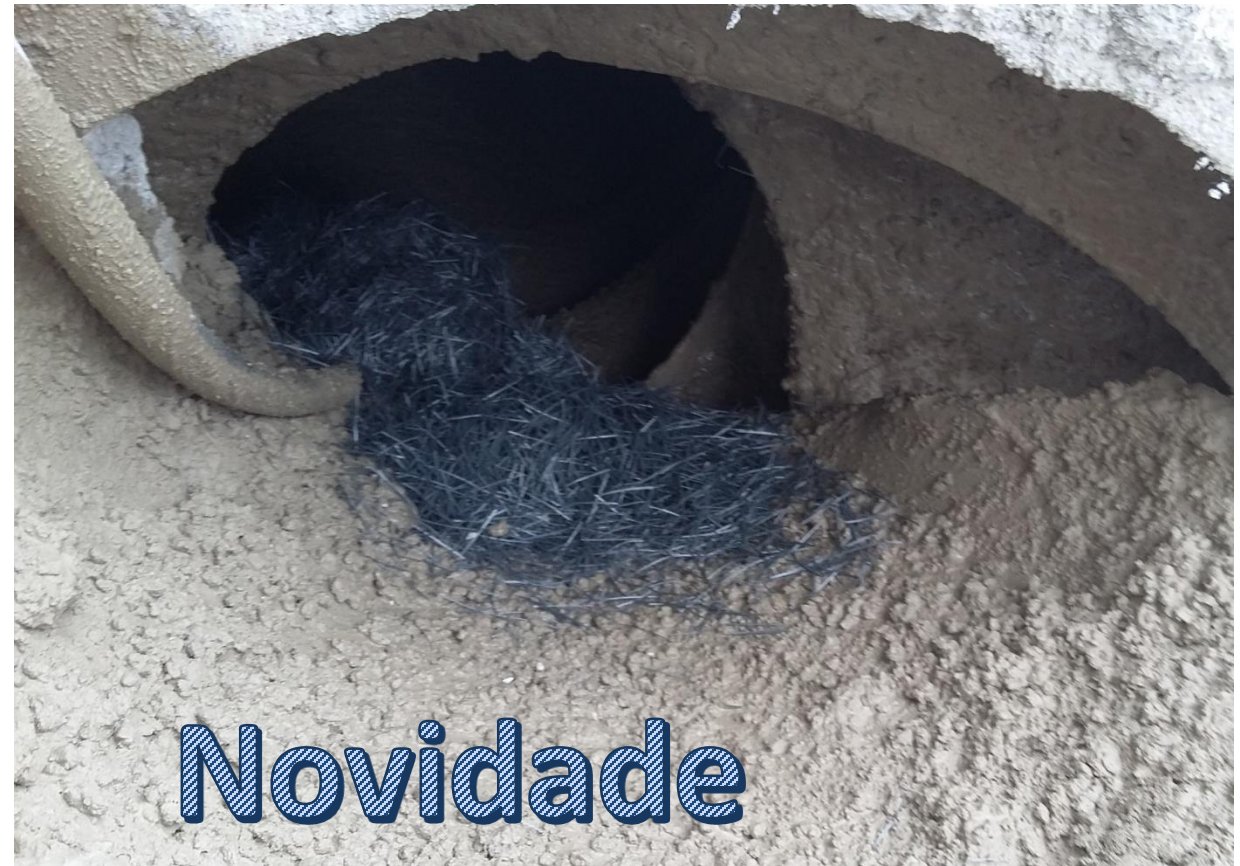
- O concreto possui uma série de características que lhe garantem o posto de material estrutural mais utilizado no mundo.
- Apresenta também limitações, especialmente quando submetido a esforços de tração:
  - comportamento marcadamente frágil
  - resistência baixa quando comparada à resistência à compressão
  - baixa capacidade de deformação
- Alternativas técnicas: concreto armado e o uso de fibras.

# Compósitos que buscam evitar o comportamento frágil do concreto e proteger o aço da agressividade do ambiente:

- Exemplo 1: concreto armado

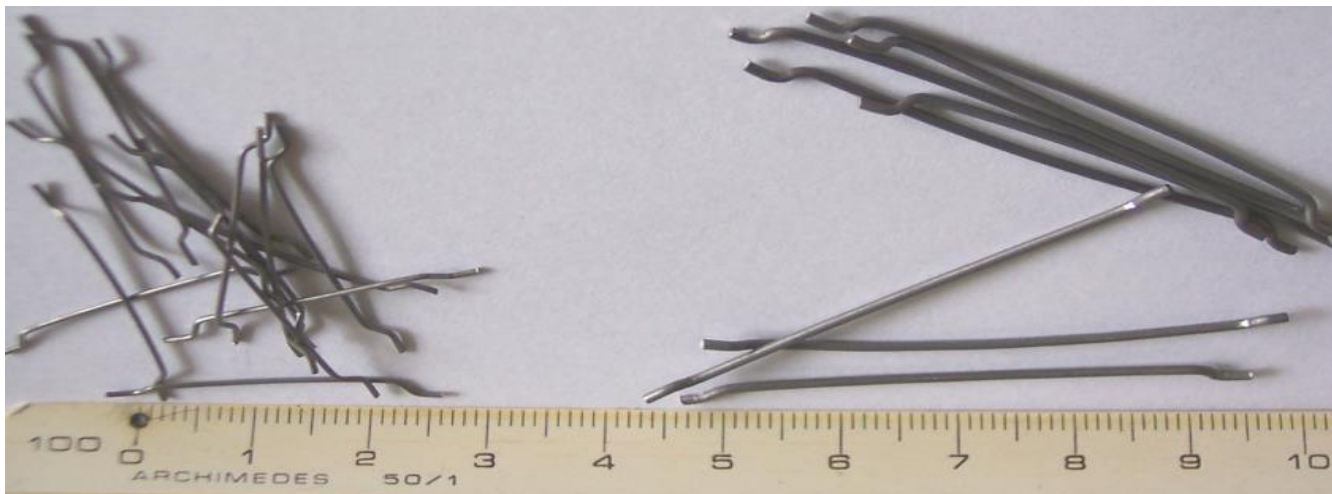
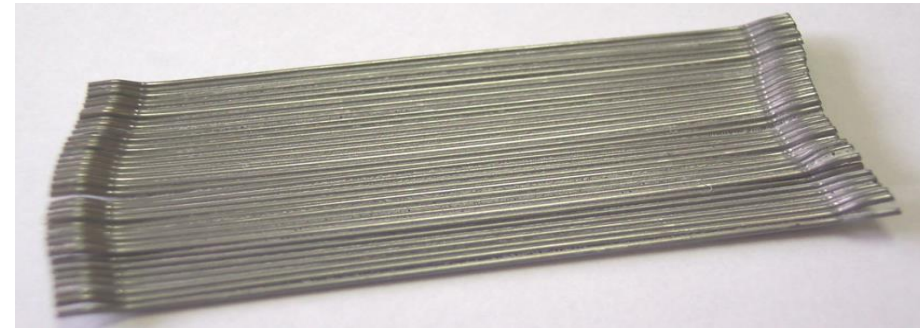


- Exemplo 2: CRF



# Muitas fibras disponíveis no mercado

## Aço



## NBR 15530

Muitas fibras disponíveis no mercado

## Polipropileno



NBR 16942



# Muitas fibras disponíveis no mercado

## Vidro

<https://www.construquimica.com.br/wp-content/uploads/2018/07/fibra-de-vidro-para-concreto-ar-anticrack-hd.jpg>



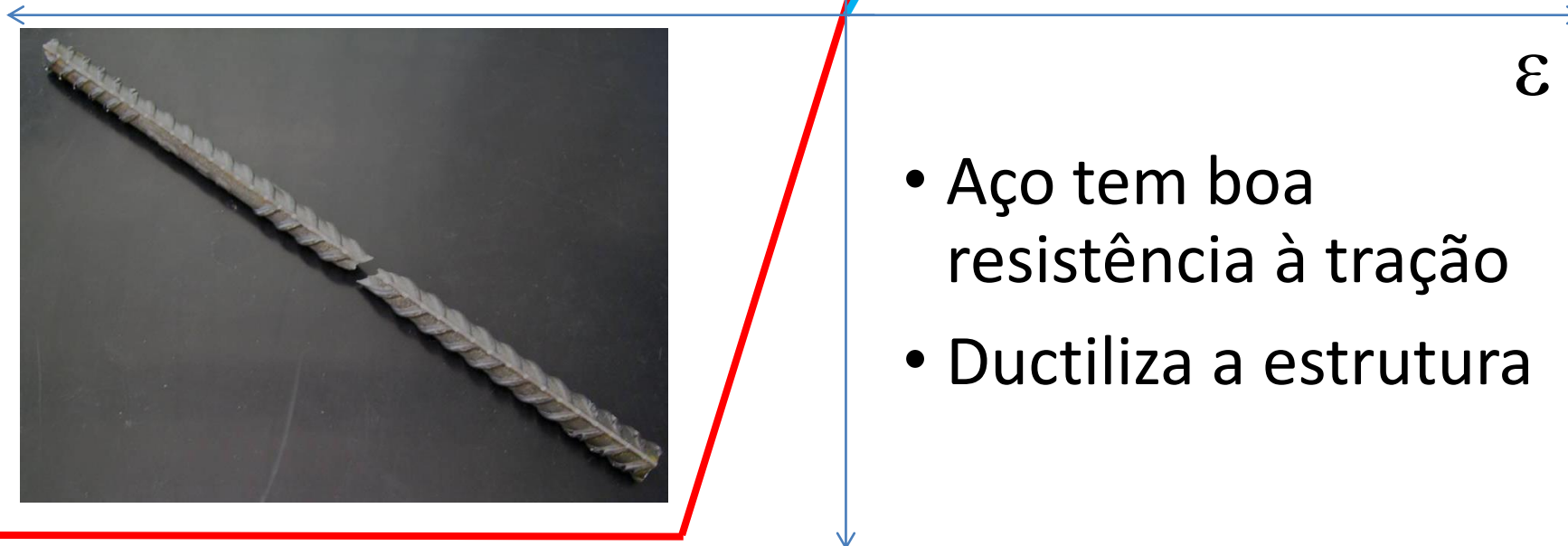
NBR 16941

<http://www.fibertex.com.br/produto/fibra-picada-estrutural/>

# Concreto armado

- Concreto tem boa resistência à compressão
- Conforma a estrutura

$\sigma$



- Aço tem boa resistência à tração
- Ductiliza a estrutura

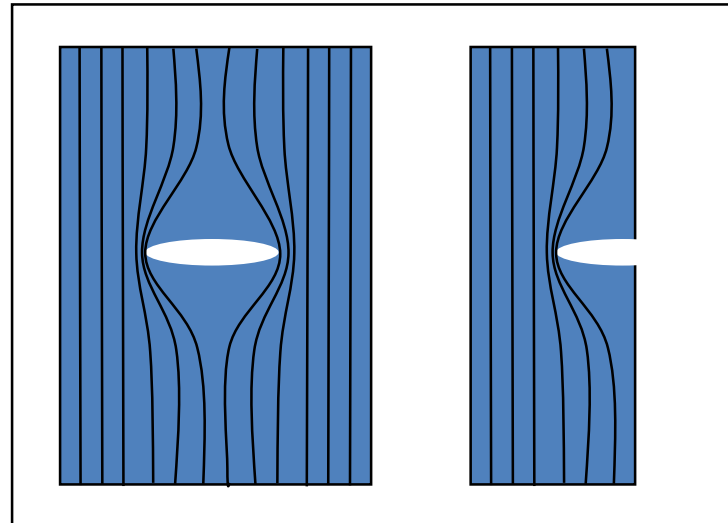
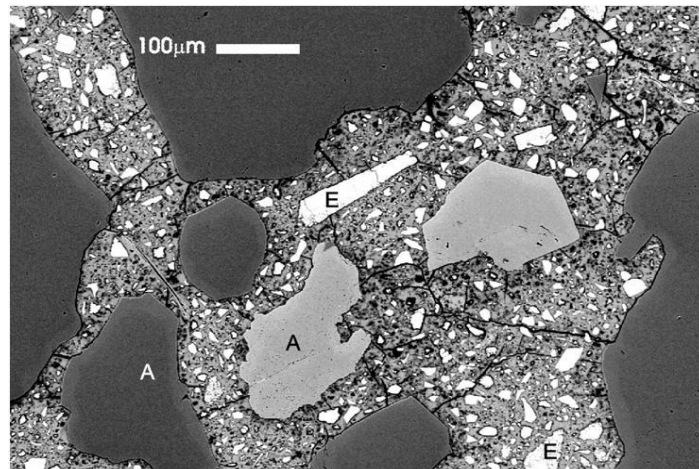
# Perguntas importantes:

- **Por que o concreto é frágil?**
- Por que o concreto possui baixo nível de capacidade de deformação?
- Por que a resistência à tração do concreto é muito inferior à da compressão?



# Concentração de tensões

- A ocorrência de singularidades ou falhas internas ou externas irão impor uma concentração de tensões diminuindo a resistência à tração do material
- Isto ocorre principalmente para tensões de tração



$$\sigma_m = \sigma_0 [1 + 2(a/\rho_e)^{1/2}]$$

Onde,

$\sigma_m$  = tensão na extremidade da fissura

$\sigma_0$  = tensão de tração aplicada no material

$a$  =  $1/2$  comprimento da trinca interna ou comprimento da trinca superficial

$\rho_e$  = raio de curvatura da extremidade da fissura

# Concentração de tensões

Quando  $a \gg \rho_e$   
tem-se nova situação:

$$\sigma_m = 2\sigma_0(a/\rho_e)^{1/2}$$

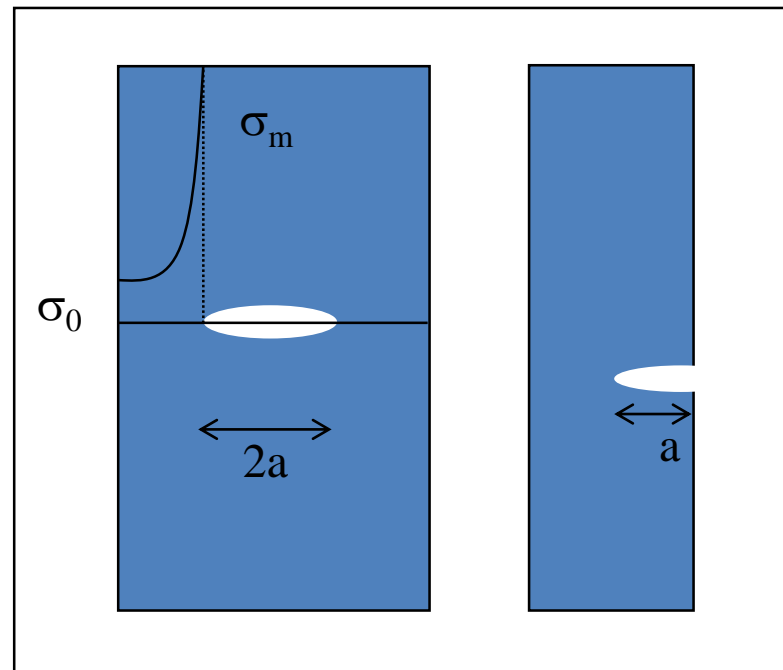
Onde,

$\sigma_m$  = tensão na extremidade da fissura

$\sigma_0$  = tensão de tração aplicada no material

$a$  =  $1/2$  comprimento da trinca interna ou comprimento da trinca superficial

$\rho_e$  = raio de curvatura da extremidade da fissura

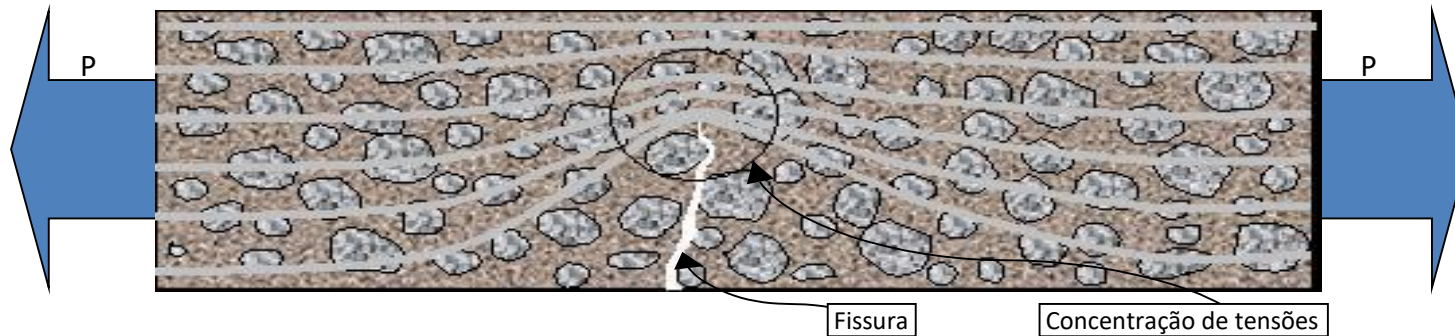


Quando  $\sigma_m$  superar a tensão de propagação da fissura: em qualquer que seja o ponto a ruptura do material é imediata

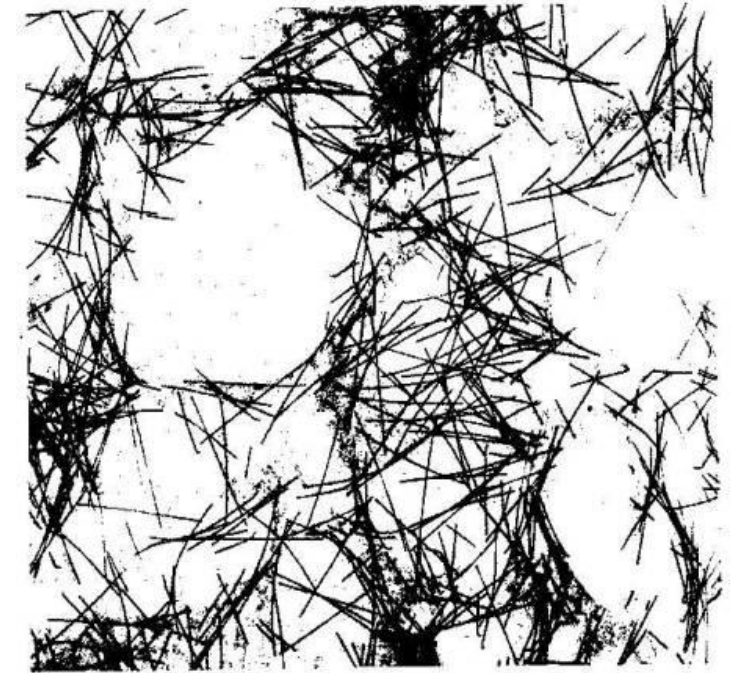
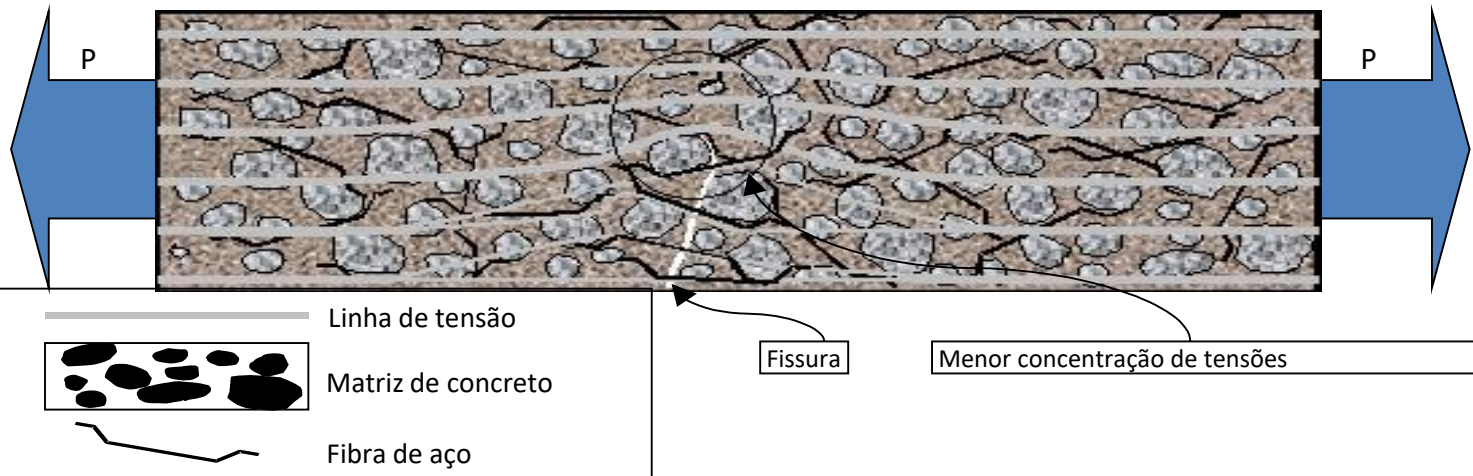
O comportamento do concreto é igualmente frágil na compressão?

# A interação Fibra X Matriz

(a) Concreto sem fibras



(b) Concreto com fibras



Disposição das fibras:  
Concentradas na  
argamassa do  
concreto

# Consequências do uso das fibras

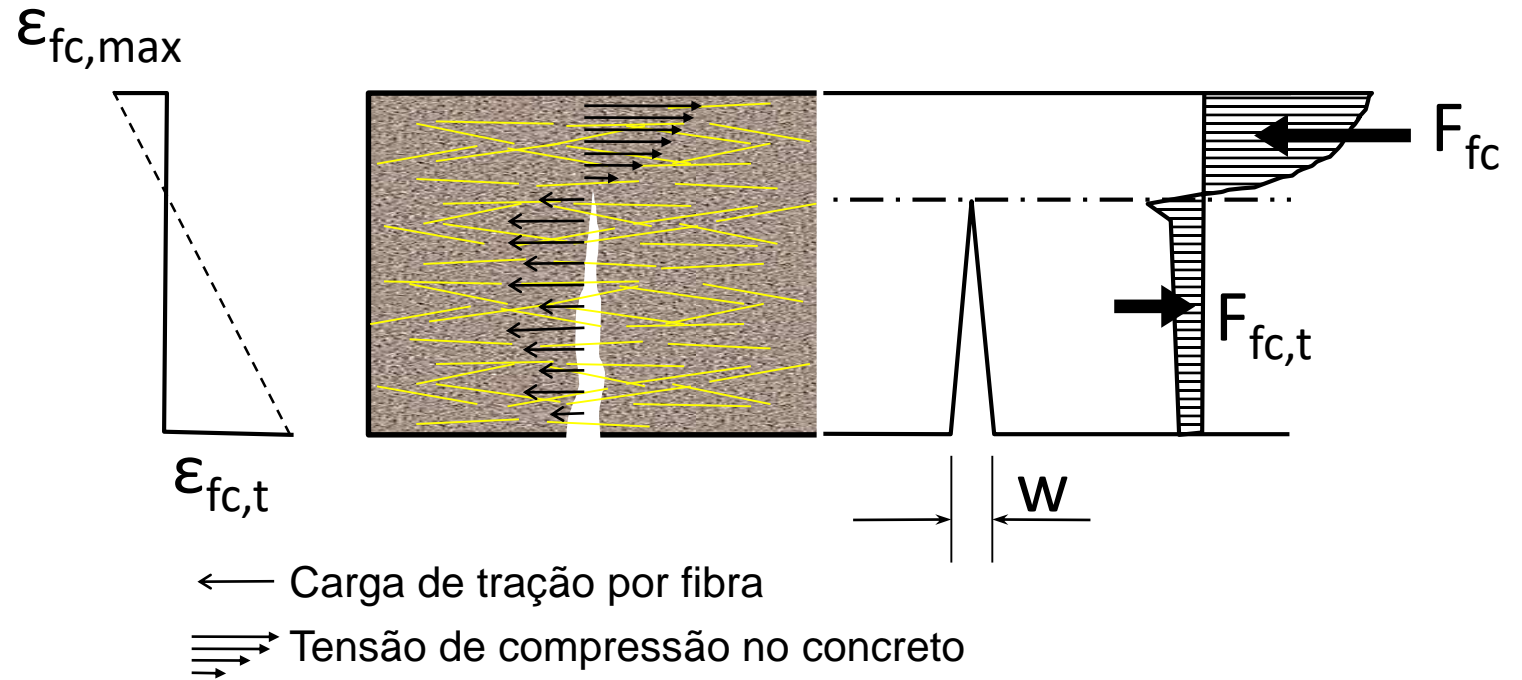
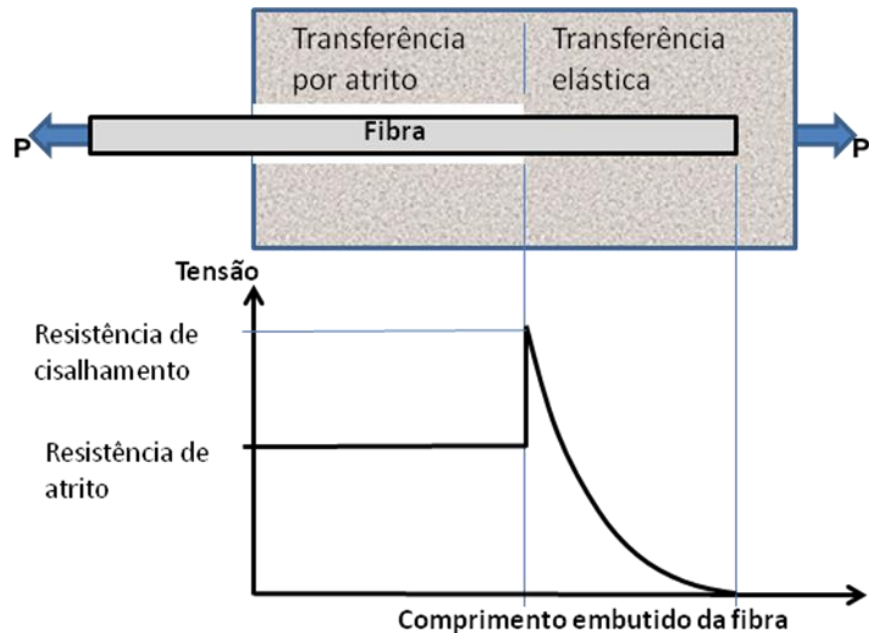
- Dificuldade de propagação da fissuração na matriz.
- Redução da fragilidade dos elementos.
- Aumento da resistência à fadiga.
- Aumento da resistência ao impacto (absorção de energia).
- Facilidade construtiva (elimina etapas da produção/installação da armadura convencional).
- Melhora a durabilidade.



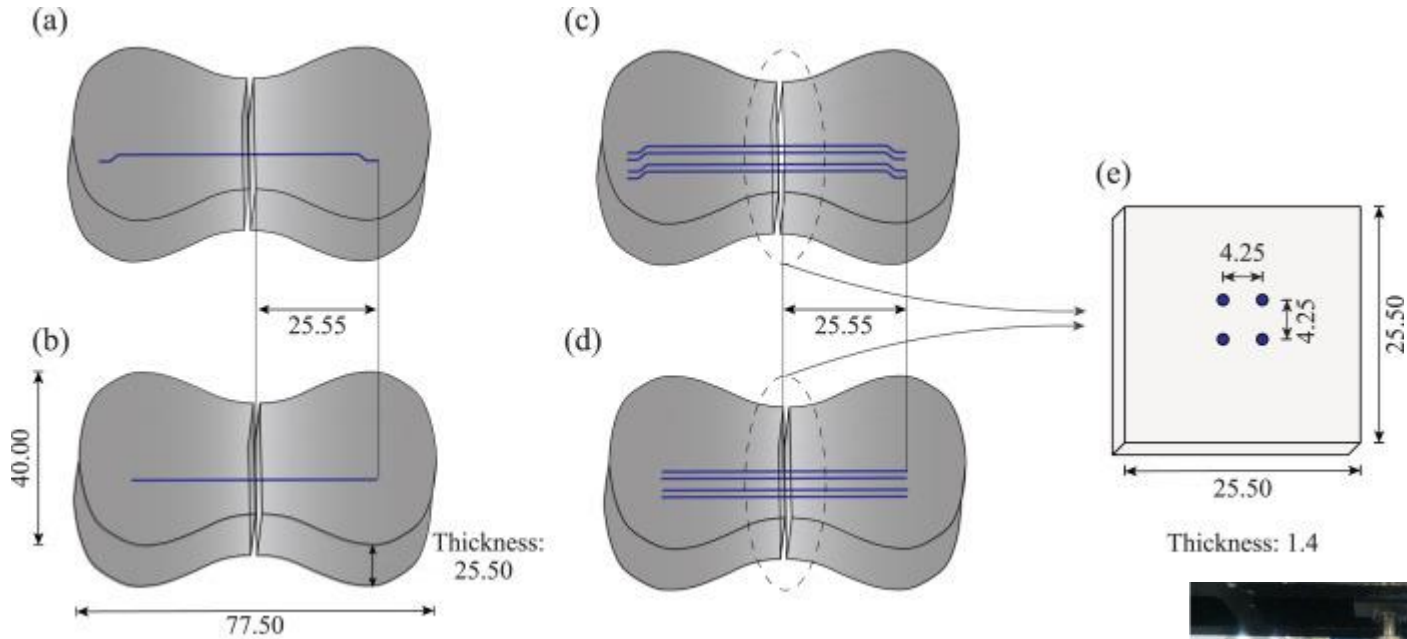
# Todas as fibras funcionam da mesma maneira?

- Não!
- Fibras diferentes têm comportamento distintos.
- Matrizes diferentes proporcionam comportamento distintos dos compósitos.
- Deve-se selecionar cada fibra para a sua condição ótima de aplicação.
- Não há soluções genéricas: soluções devem ser de engenharia.
- Deve-se compreender as **interações entre fibra e matriz**

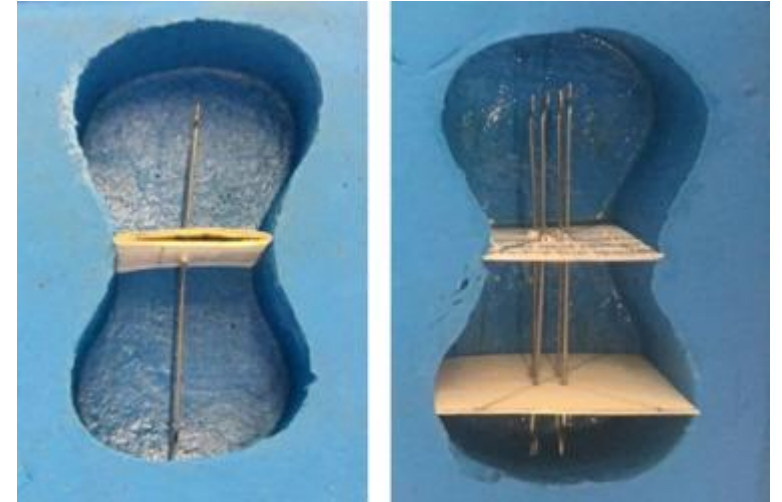
# Arrancamento da fibra (fiber pullout)



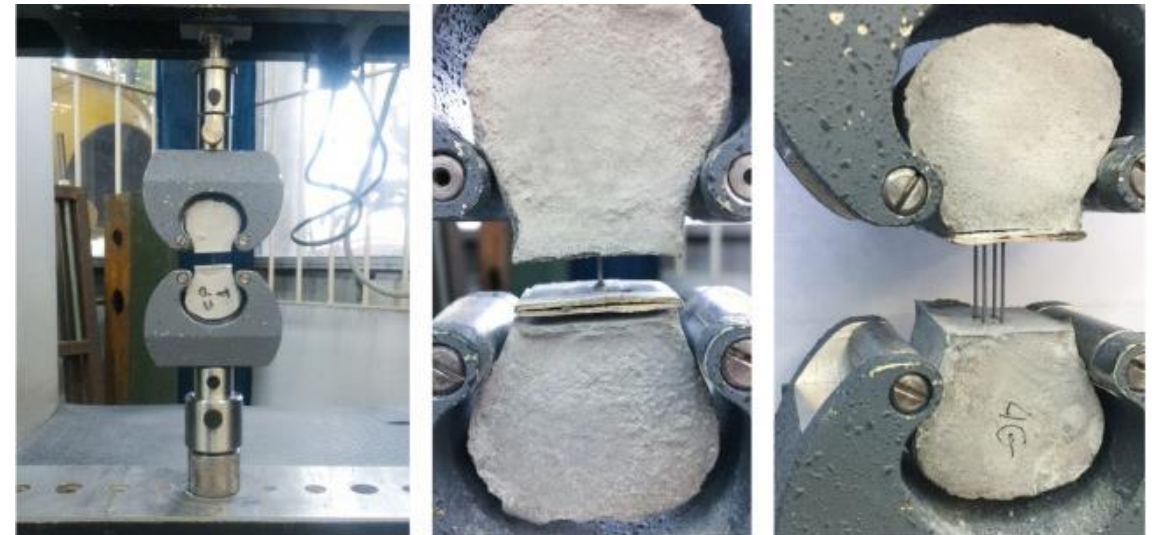
# Influência do gancho no pullout



\* Measures in mm.

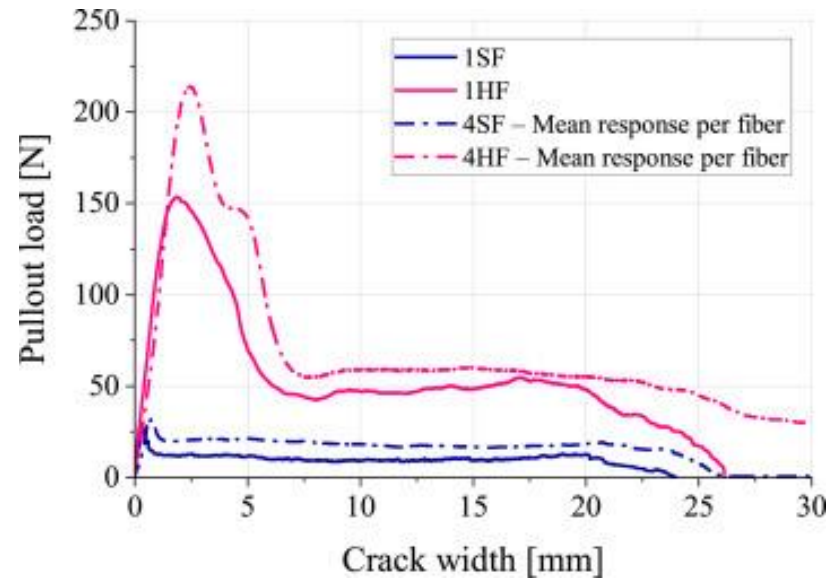
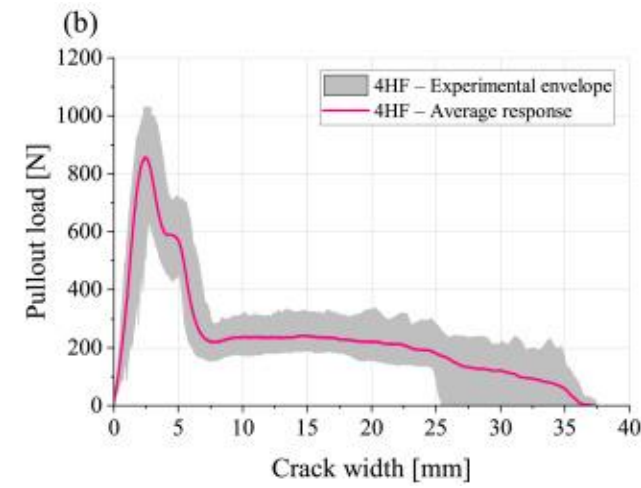
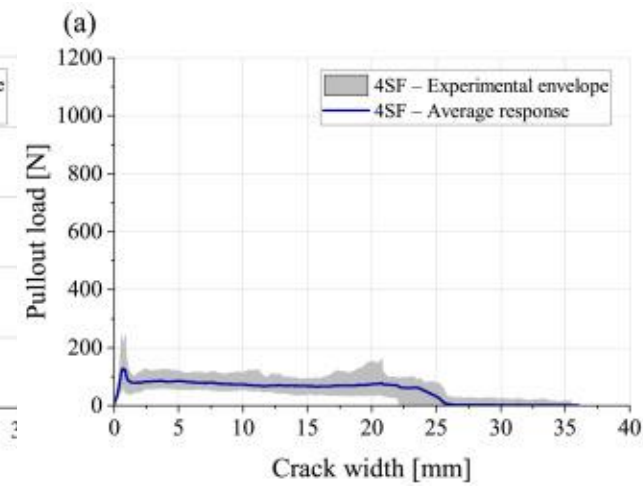
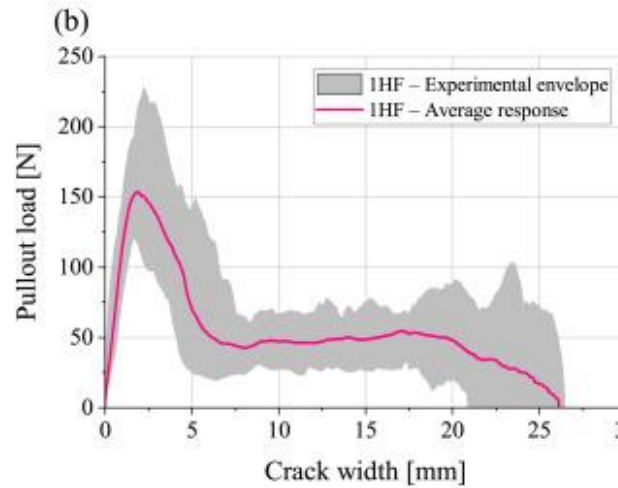
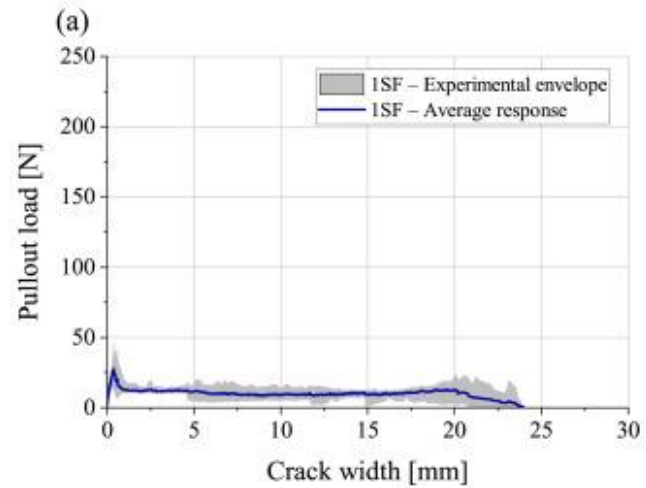


Avaliação do efeito da geometria da fibra (reta ou com gancho) na resistência ao arrancamento.

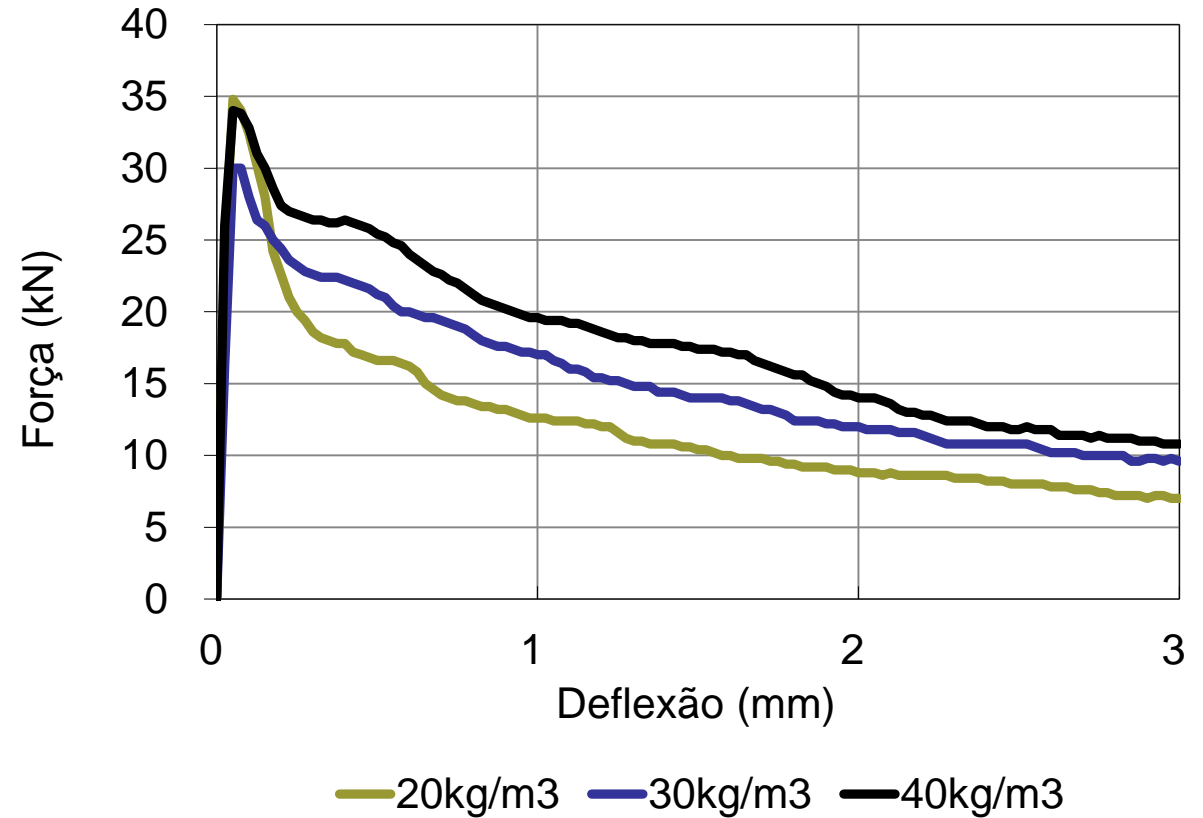
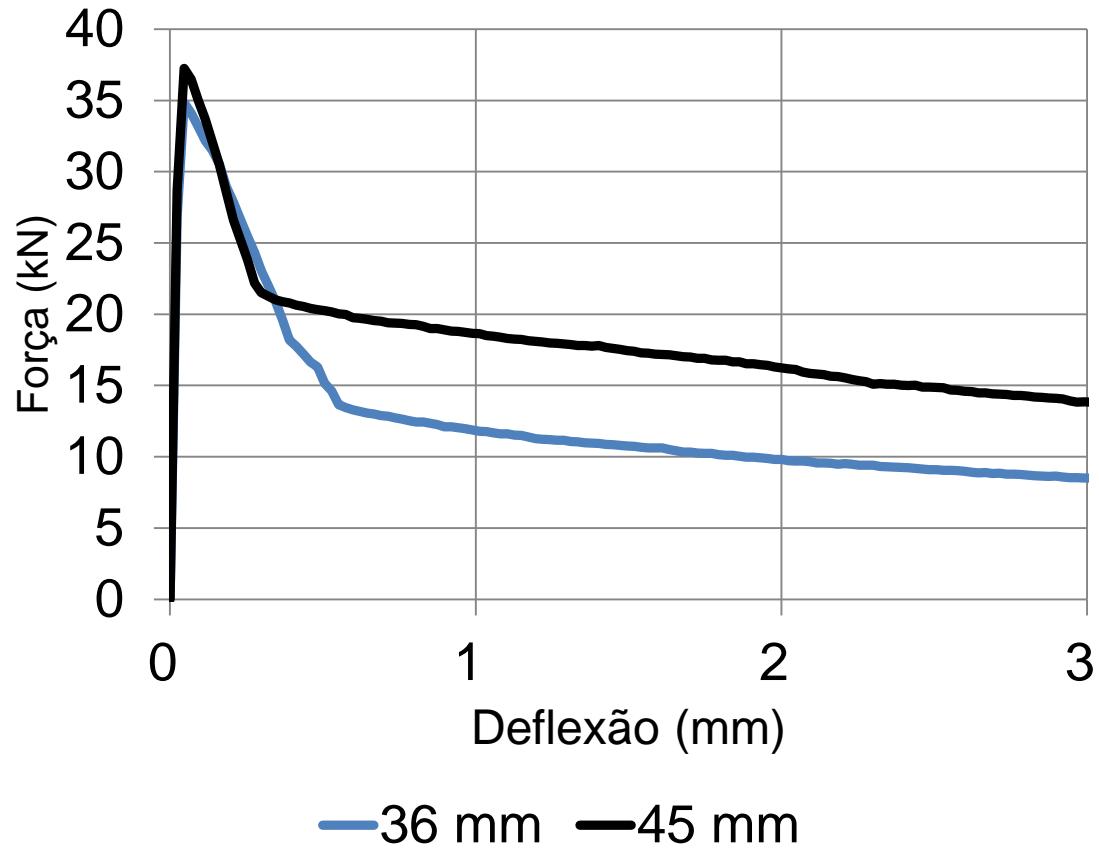




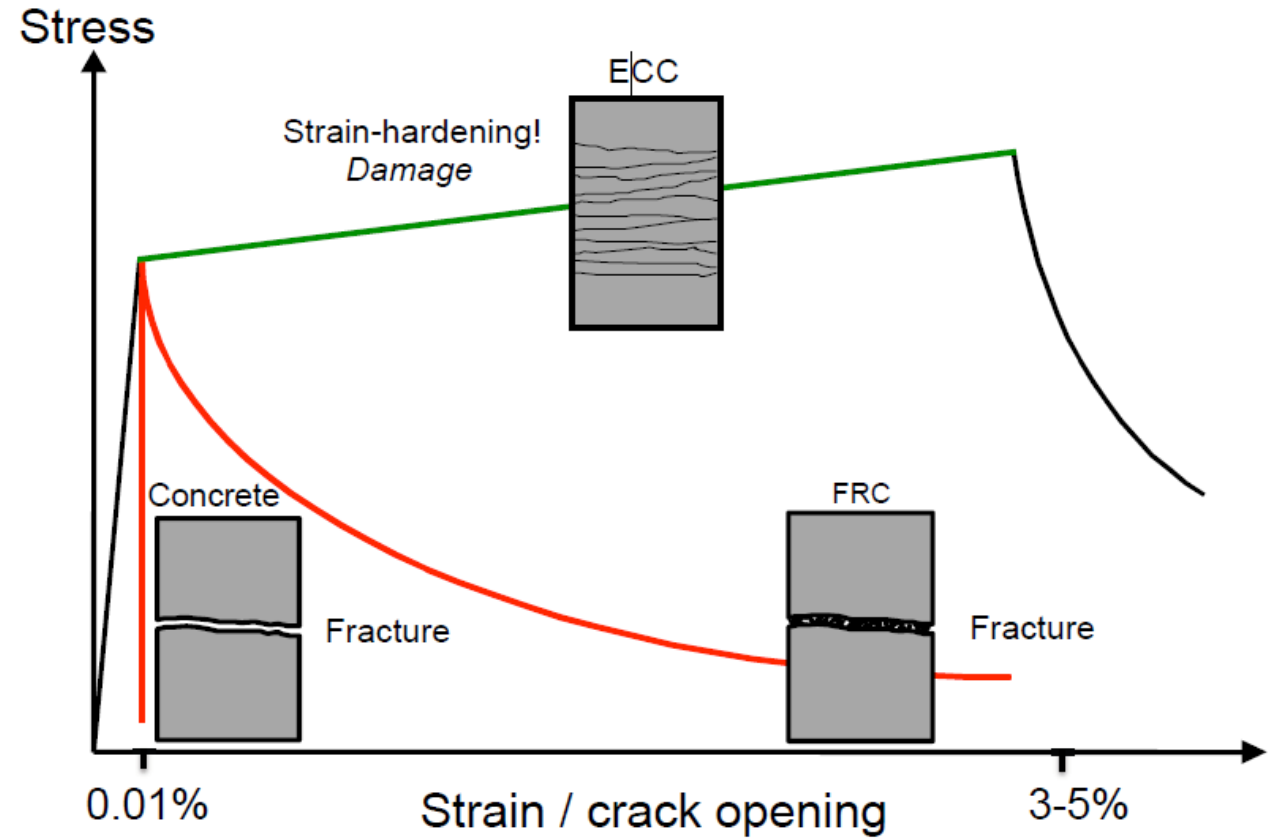
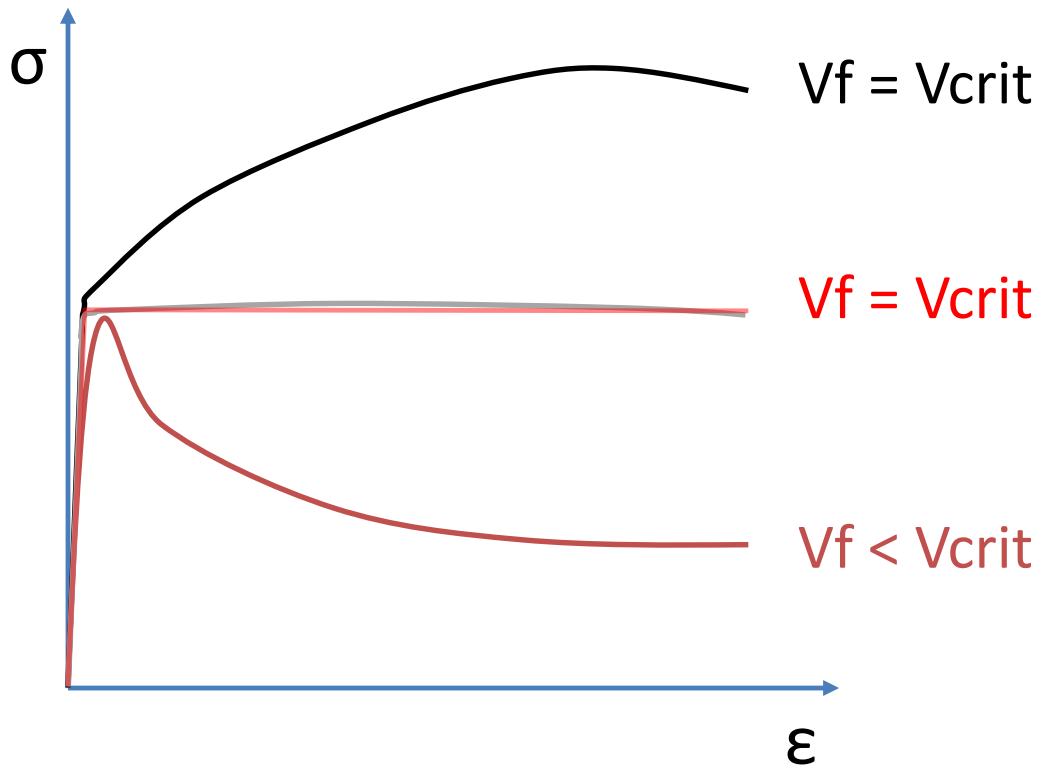
# Influência do gancho no pullout



# Melhora da eficiência: comprimento X teor

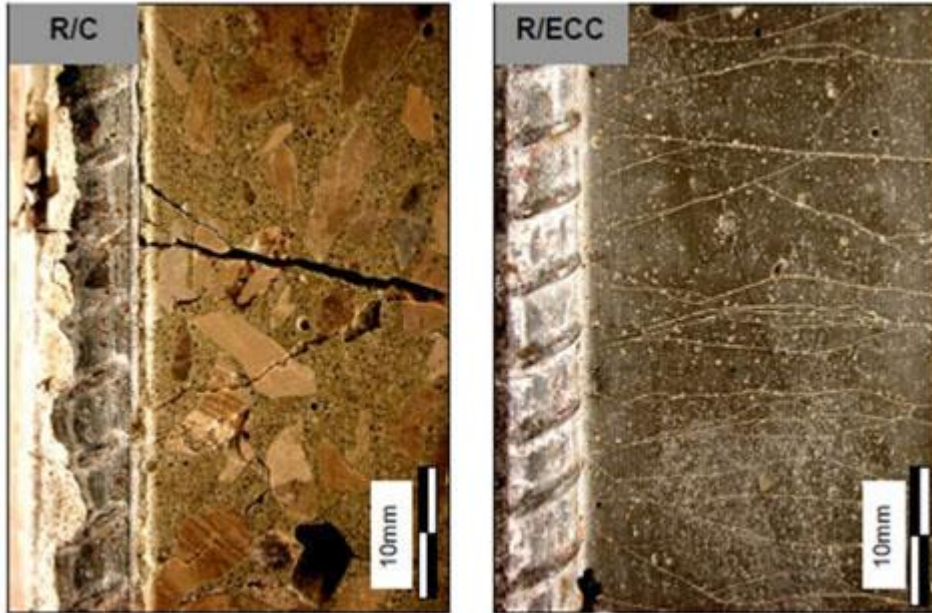


# O efeito do teor de fibras



Victor Li

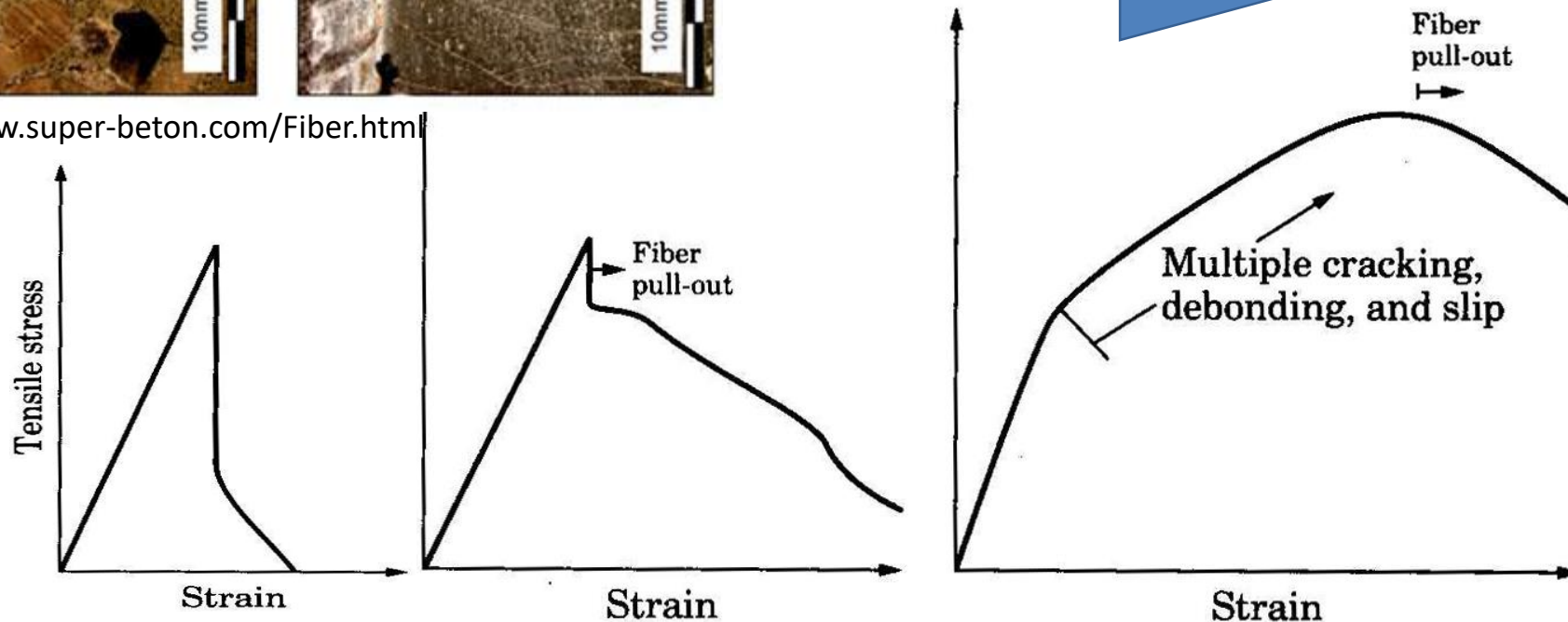
# CRF: Interação Fibra-Matrix



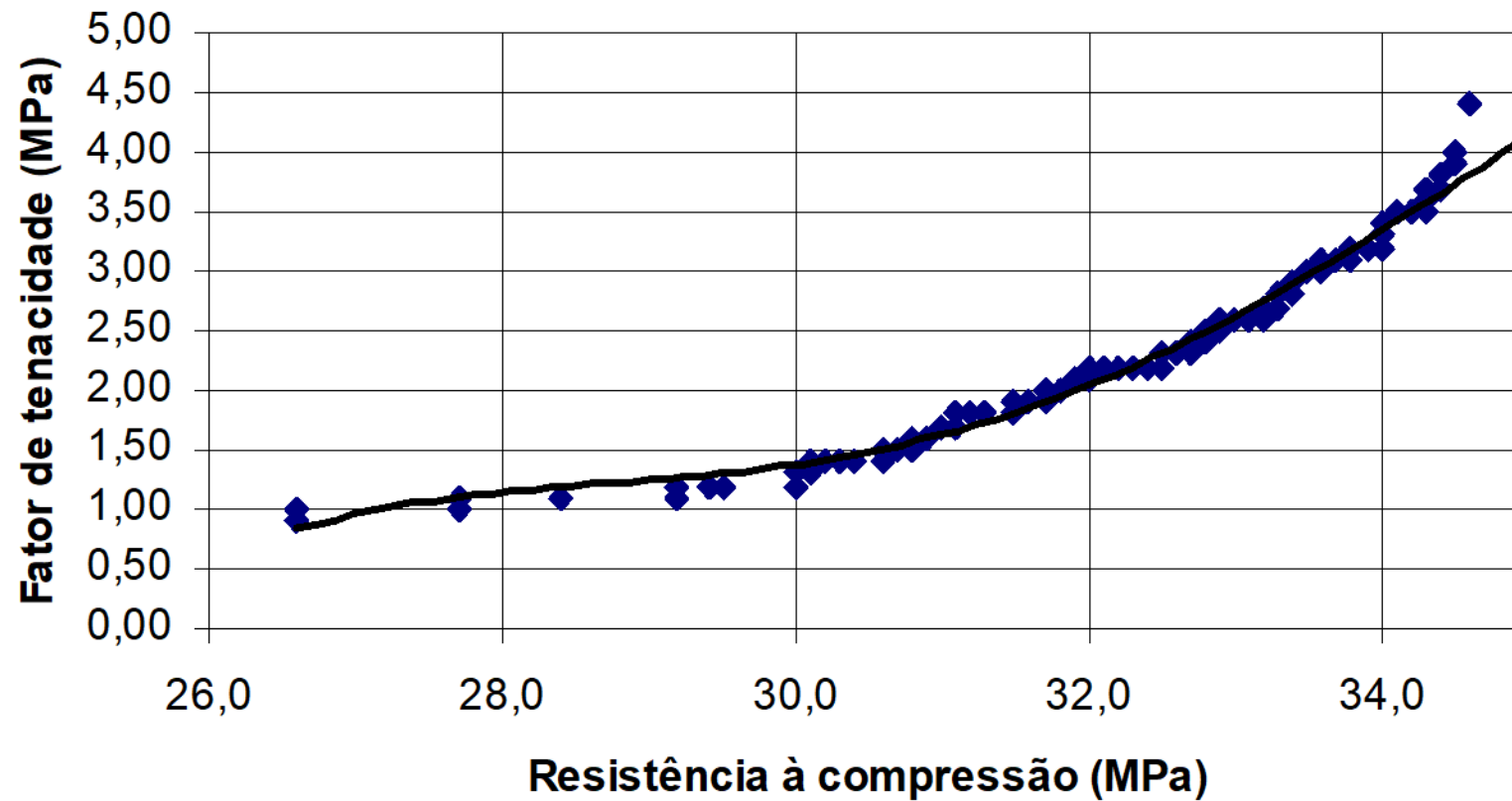
Num composto de fibras resistentes e matriz frágil, a resistência residual pós-fissuração aumenta com o incremento no teor de fibra.

Aumento do teor de fibra

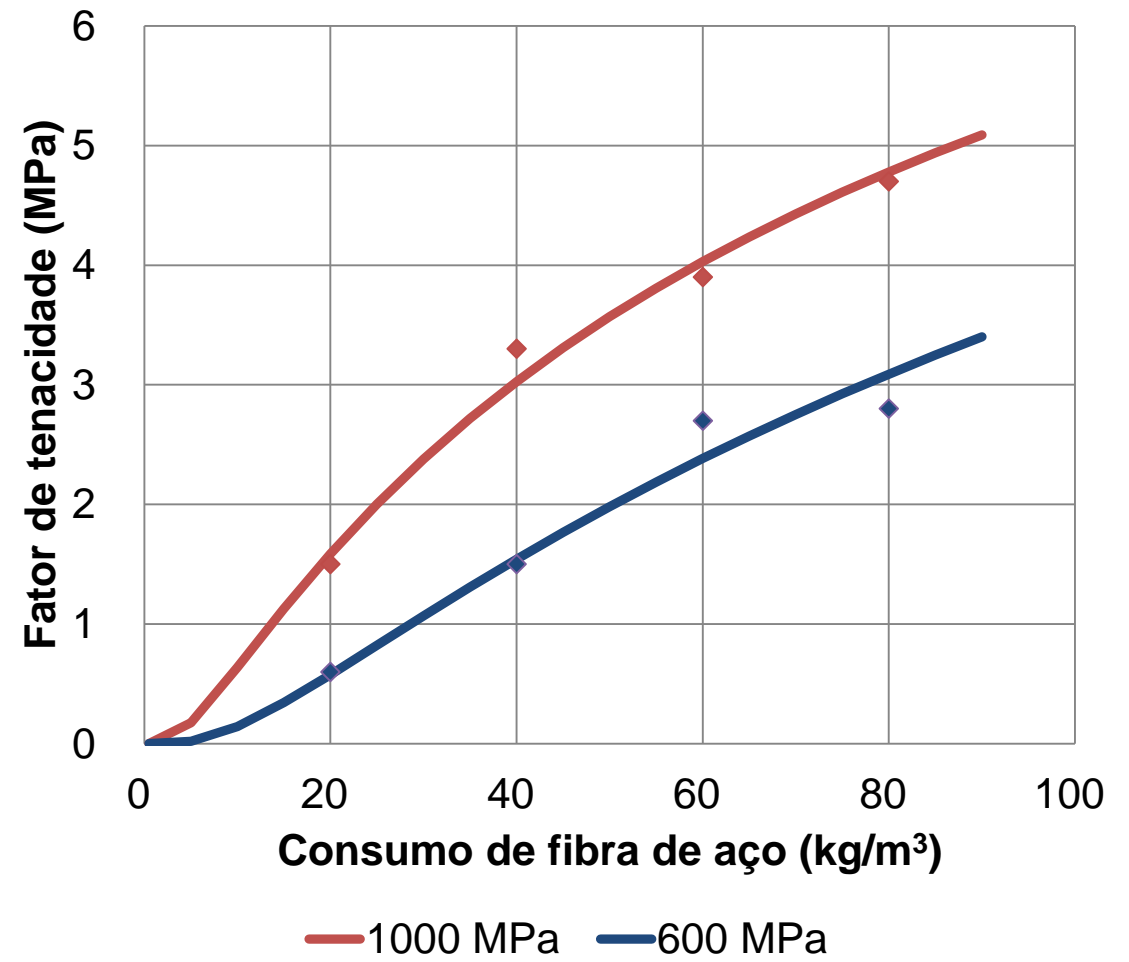
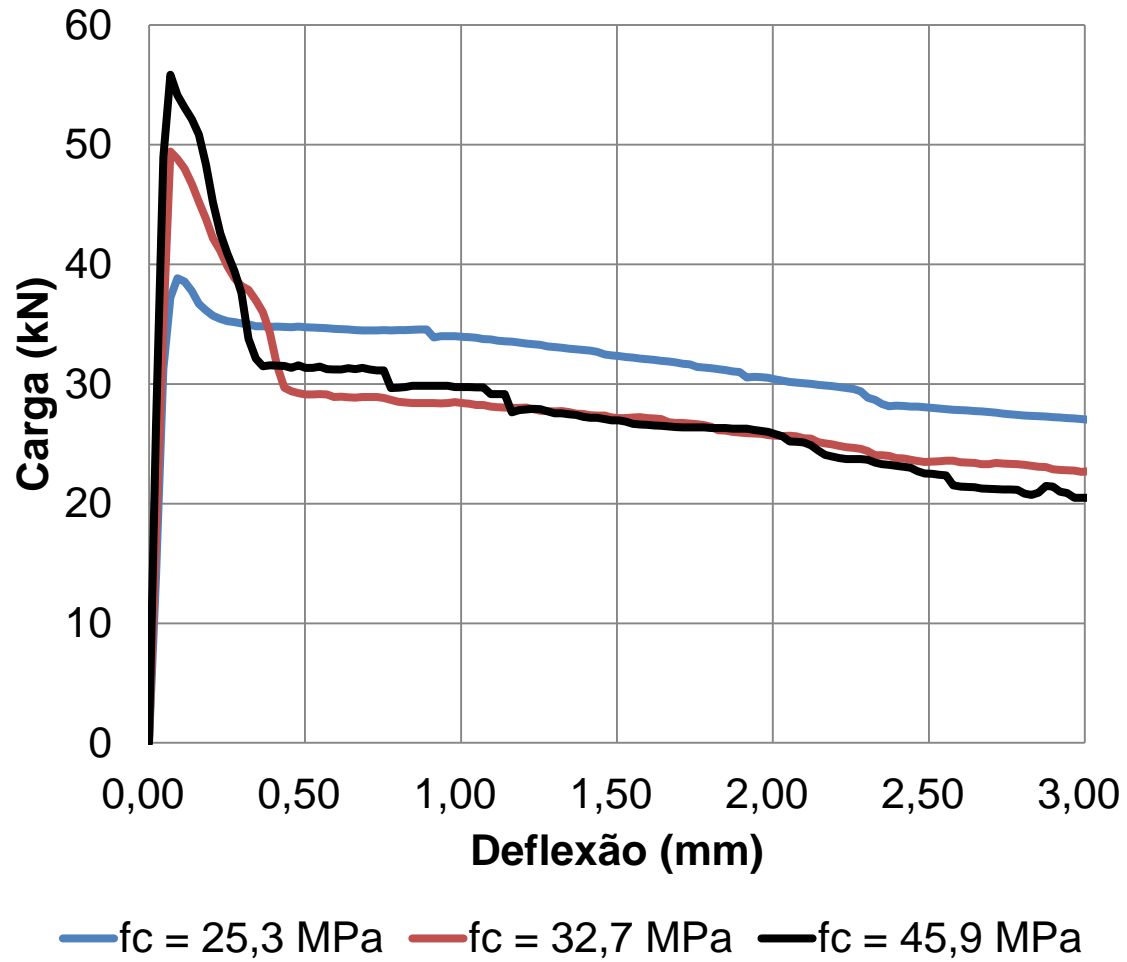
<http://www.super-beton.com/Fiber.html>



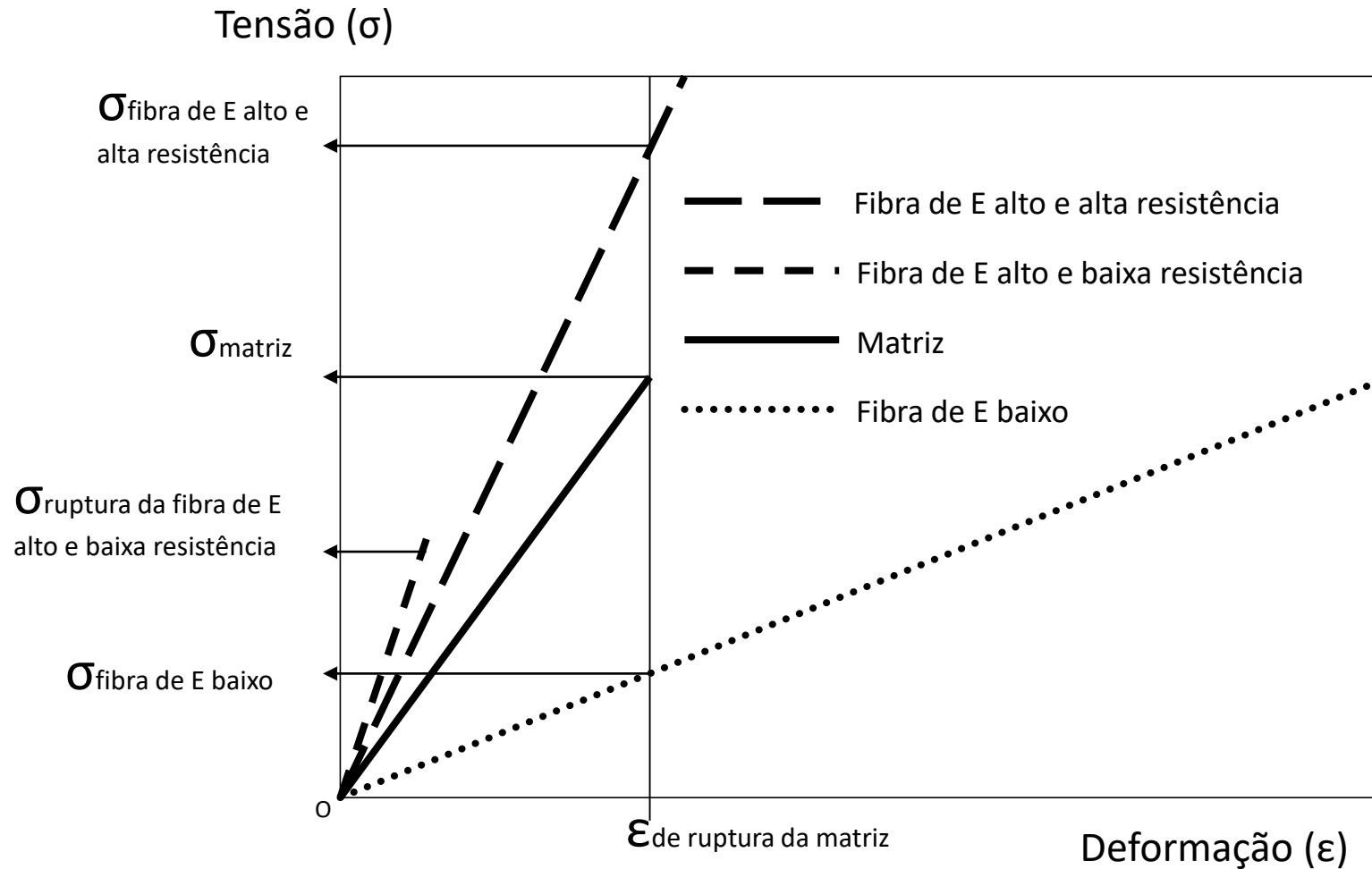
# O efeito da resistência da matriz em relação a fibras de alta resistência



# O efeito da resistência da matriz e da fibra



# Condição de reforço do compósito: o efeito do E da fibra



# Direcionamento e orientação da fibra

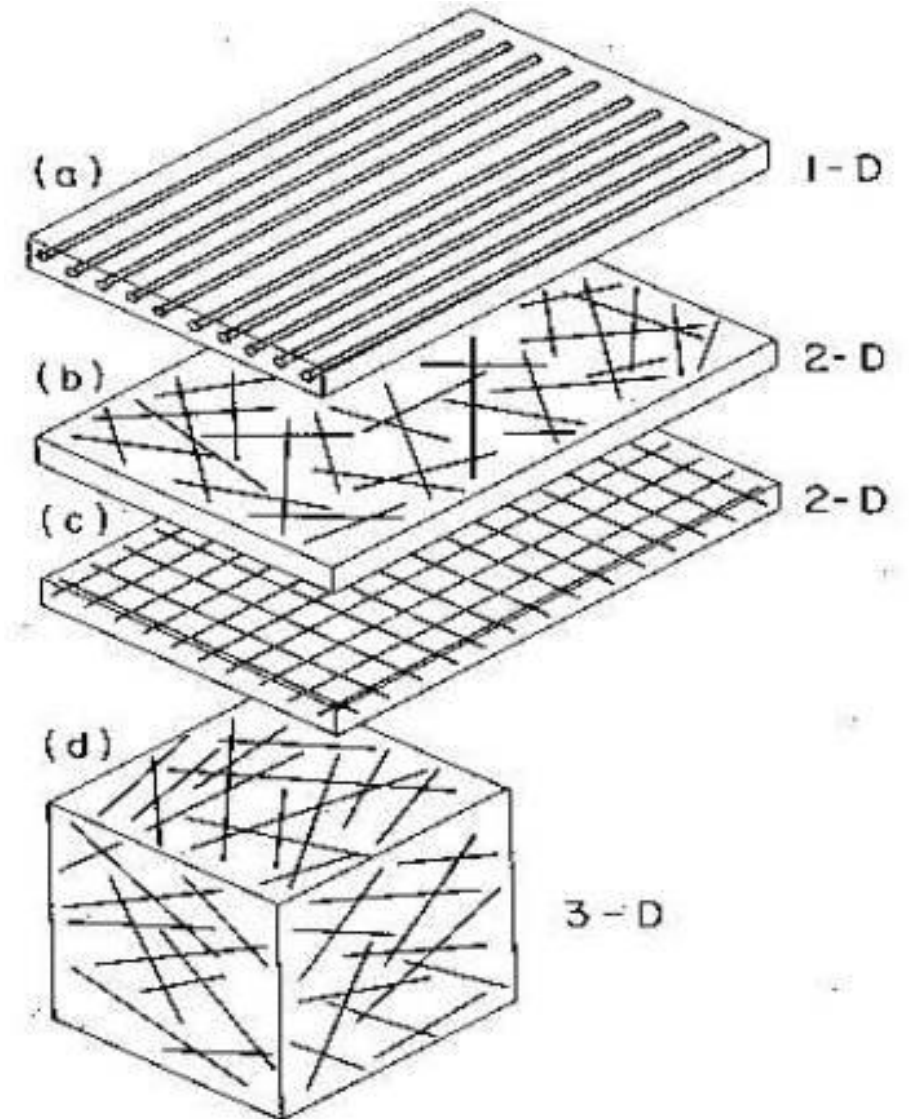
Disposição das fibras:      Arranjo

(a) monodimensional;      (a, c) Contínuo;

(b,c) bidimensional;      (b, d) Descontínuo;

(d) tridimensional;

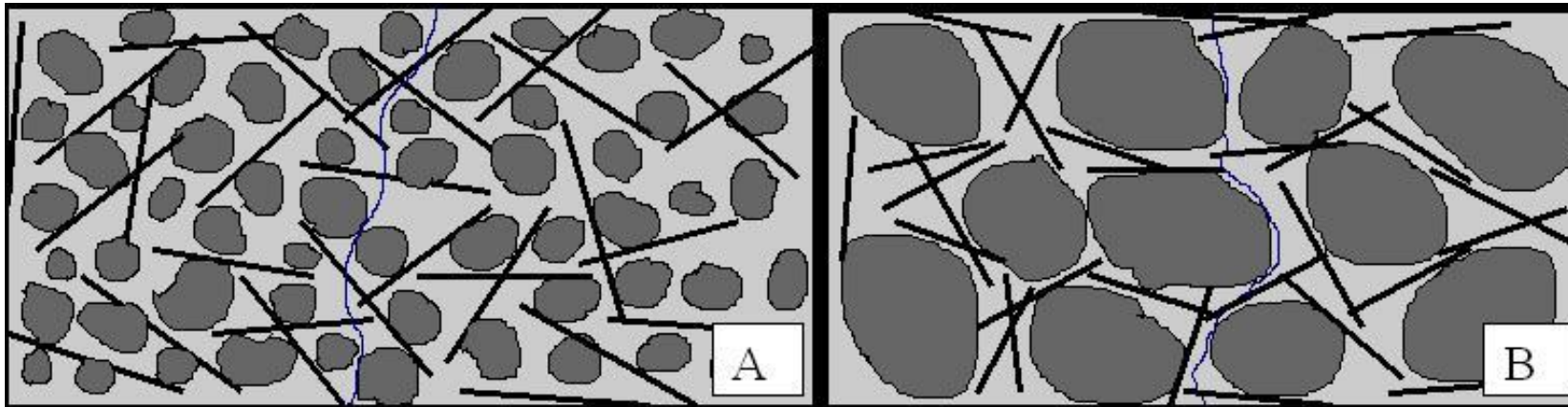
Orientação da fibra	Fator de eficiência para orientação	
	Não confinado	Confinado
1D	1	1
2D	1/3	3/8
3D	1/6	1/5





# A orientação em função dos agregados

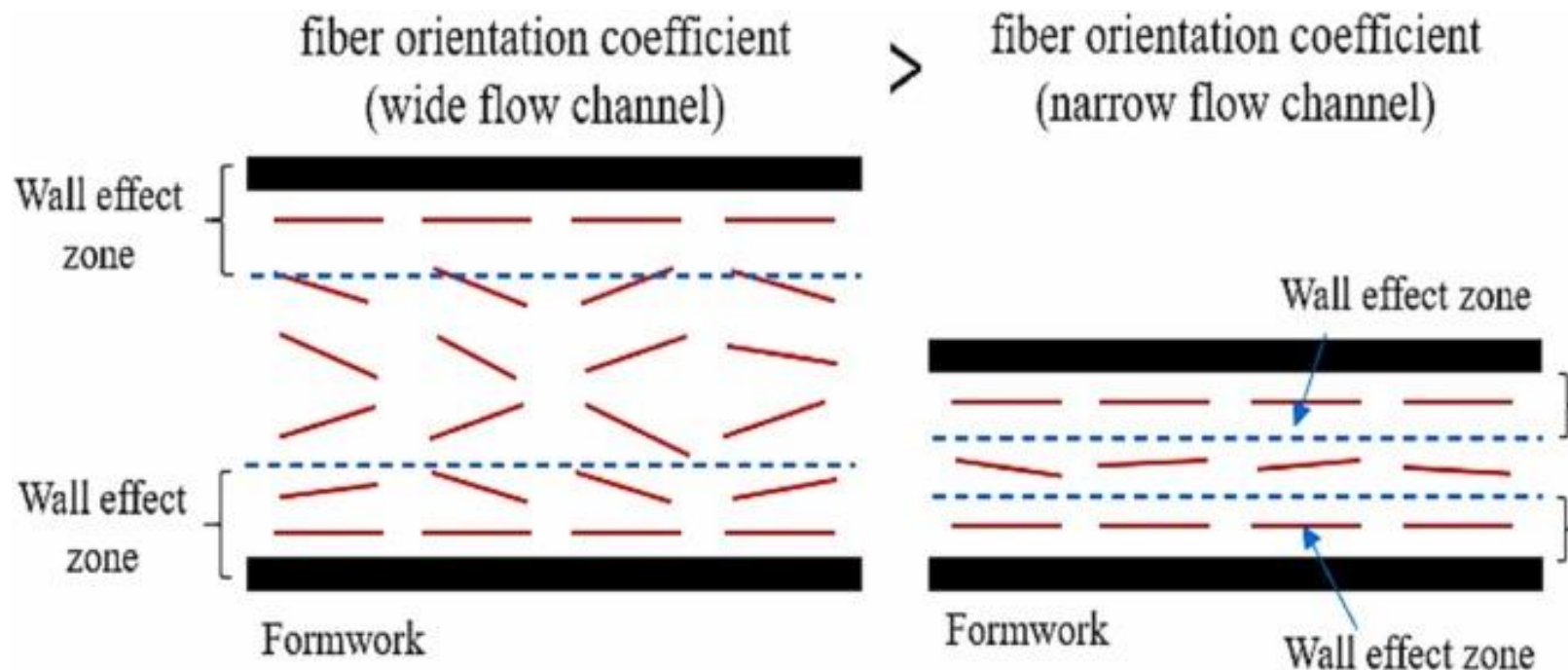
- Agregados maiores favorecem a inclinações maiores das fibras e menor eficiência de reforço.



Compósito A: compatibilidade dimensional entre fibra e matriz

Compósito B: incompatibilidade dimensional entre fibra e matriz

# Orientação das fibras por efeito parede



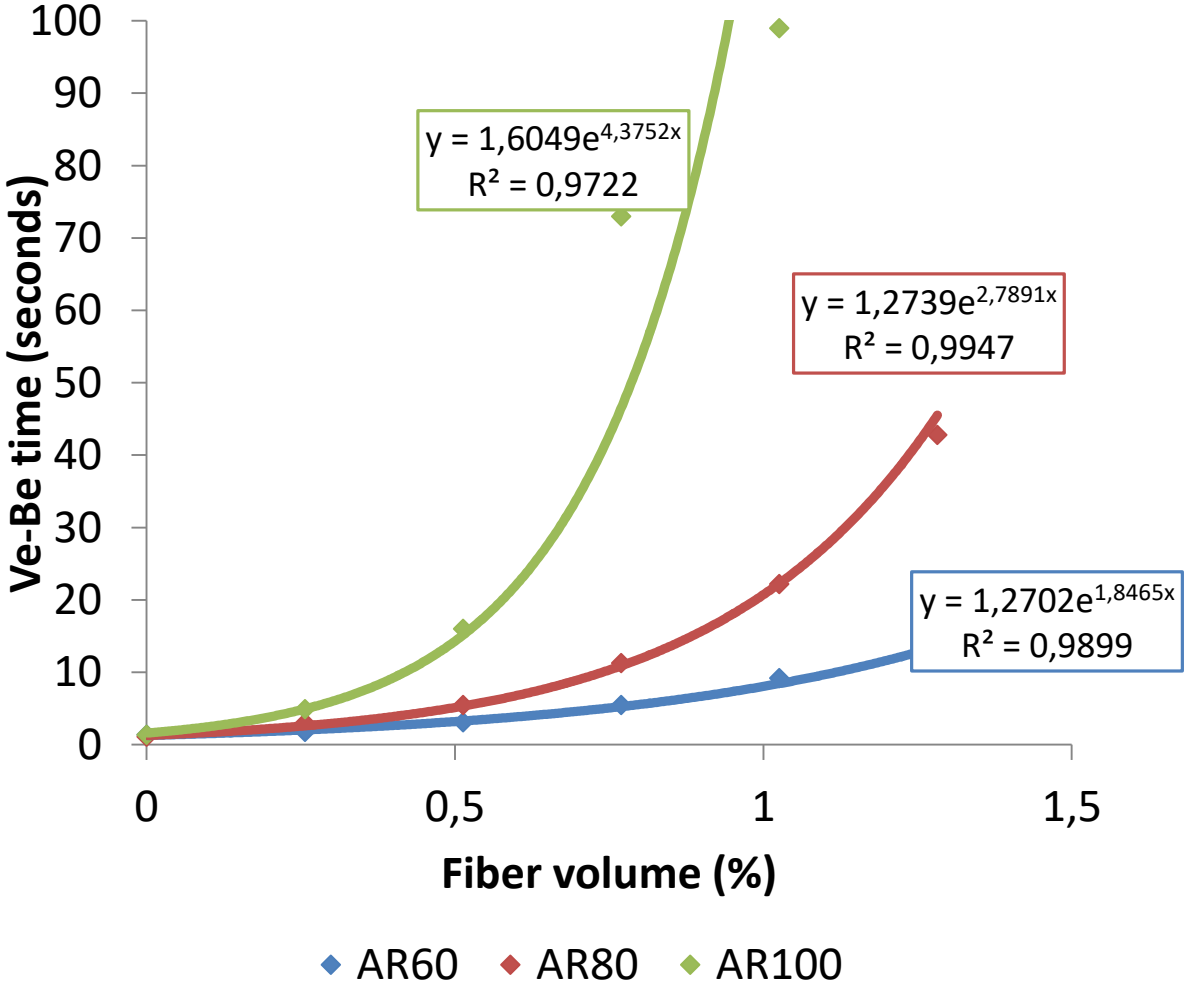
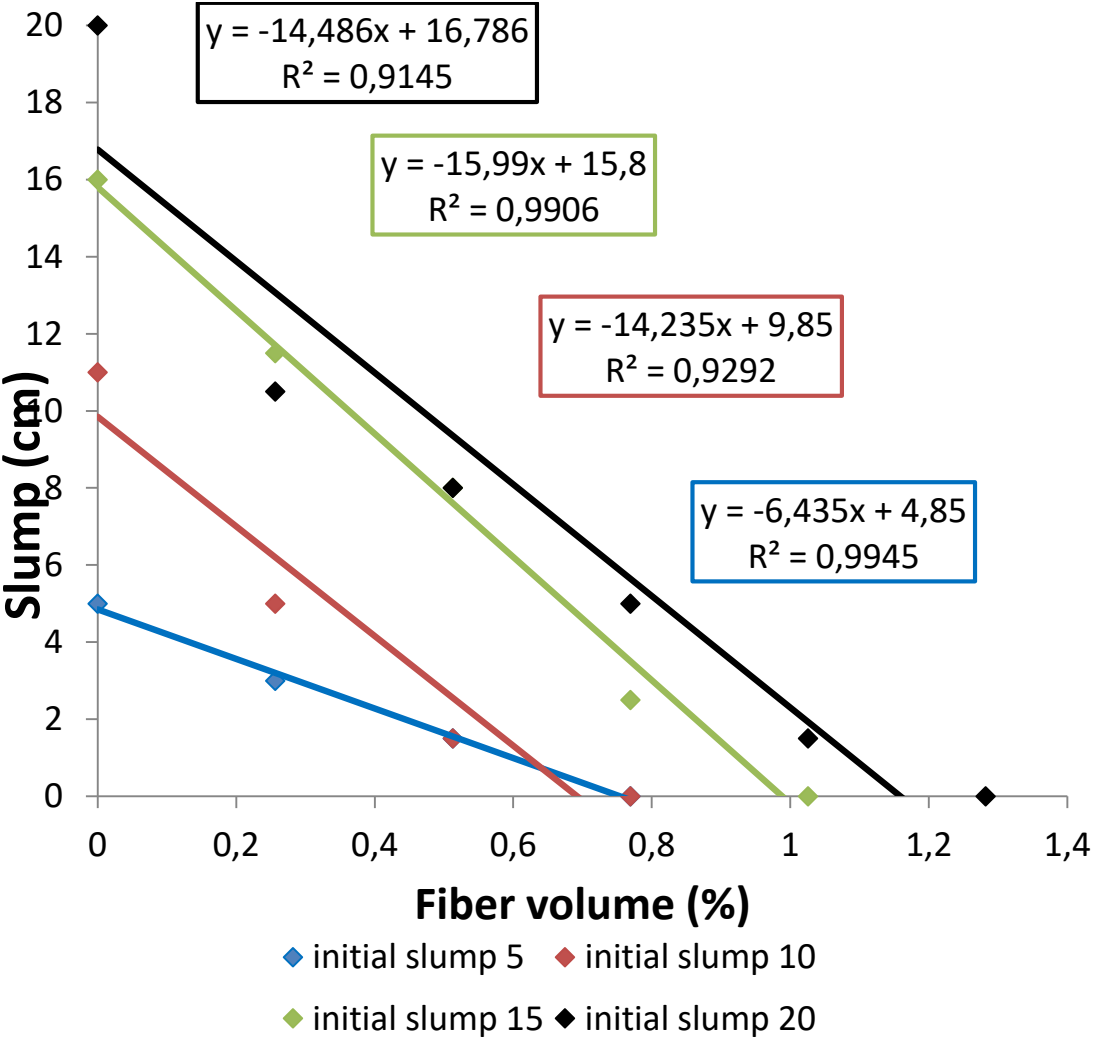
Mahmoud H. Akeed, Shaker Qaidi, Hemn U. Ahmed, Wael Emad, Rabar H. Faraj, Ahmed S. Mohammed, Bassam A. Tayeh, Afonso R.G. Azevedo. Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part III: Fresh and hardened properties. *Case Studies in Construction Materials*, Volume 17, 2022, e01265, doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01265.

# CRF: avaliação específica da trabalhabilidade

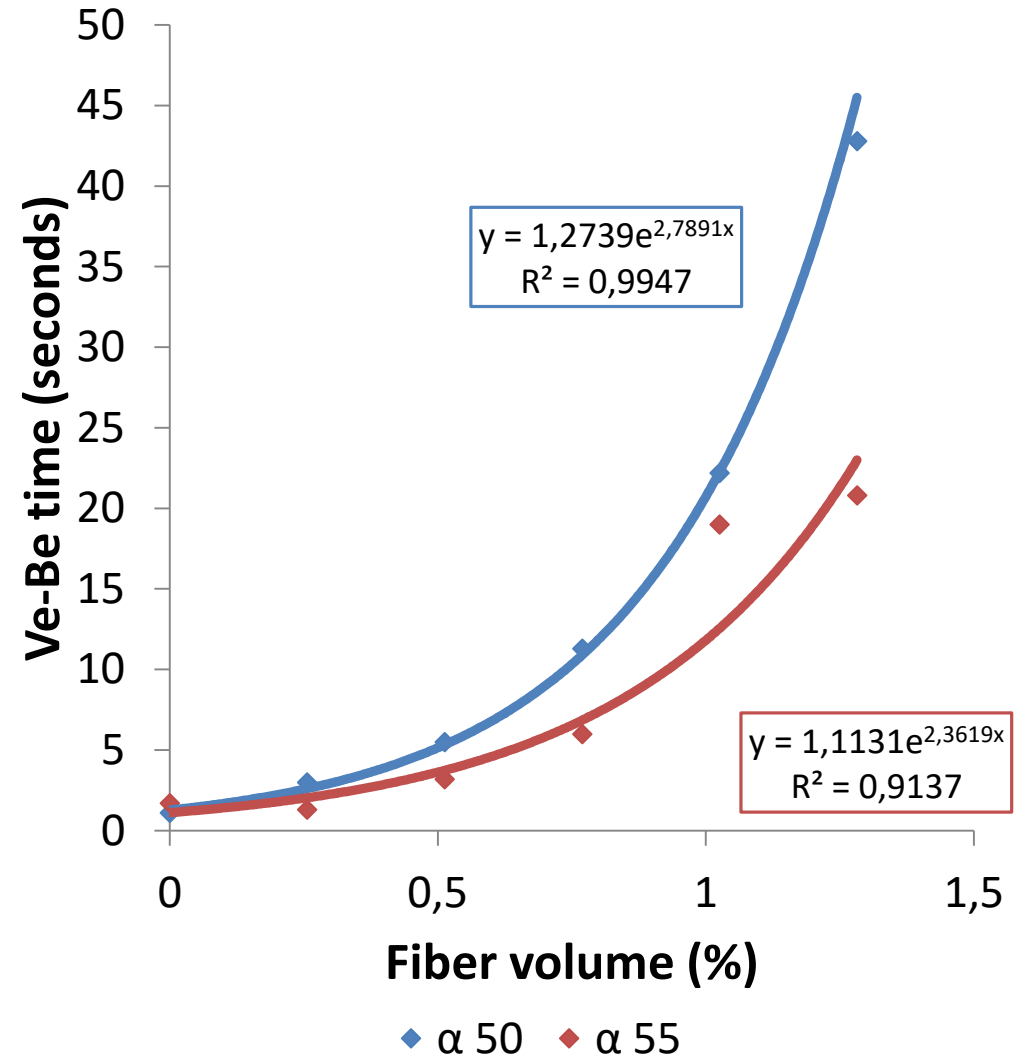
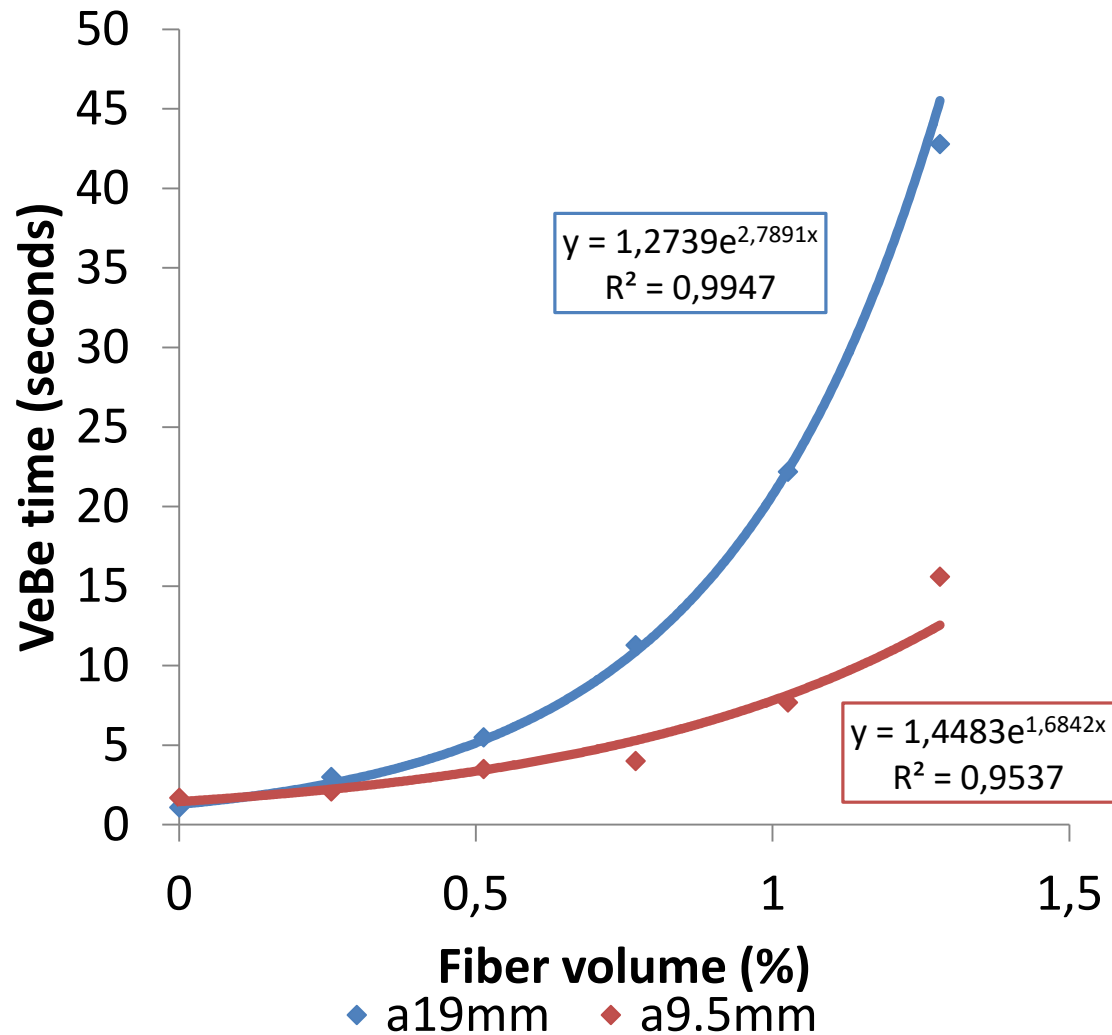


FIGUEIREDO, A.D.; CECCATO, M. R. Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Slump and Ve-Be Test. *Materials Research*, p. 1, 2015.

# Fibras reduzem mobilidade do concreto



# Fibras dificultam a compactação do material: pior com agregados maiores e menos argamassa



# Nem tudo é vantagem

R\$17,00/kg – 30kg/m<sup>3</sup> gera um custo de R\$ 510,00/m<sup>3</sup>

## Custo:

Inviável em aplicações corriqueiras e com teores muito altos

Custo global favorável

estrutura como um todo

execução

custos de manutenção

Resistência do usuário (problema cultural)

Produtos de baixa qualidade presentes no mercado

Diversidade de enfoques tecnológicos

Falta de cultura para projeto e dimensionamento

# Estruturas convencionais

Aplicação do CRF em lajes suspensas  
como único sistema de reforço em edifício  
multipavimentos construído na Estônia  
(DESTRÉE, 2009)

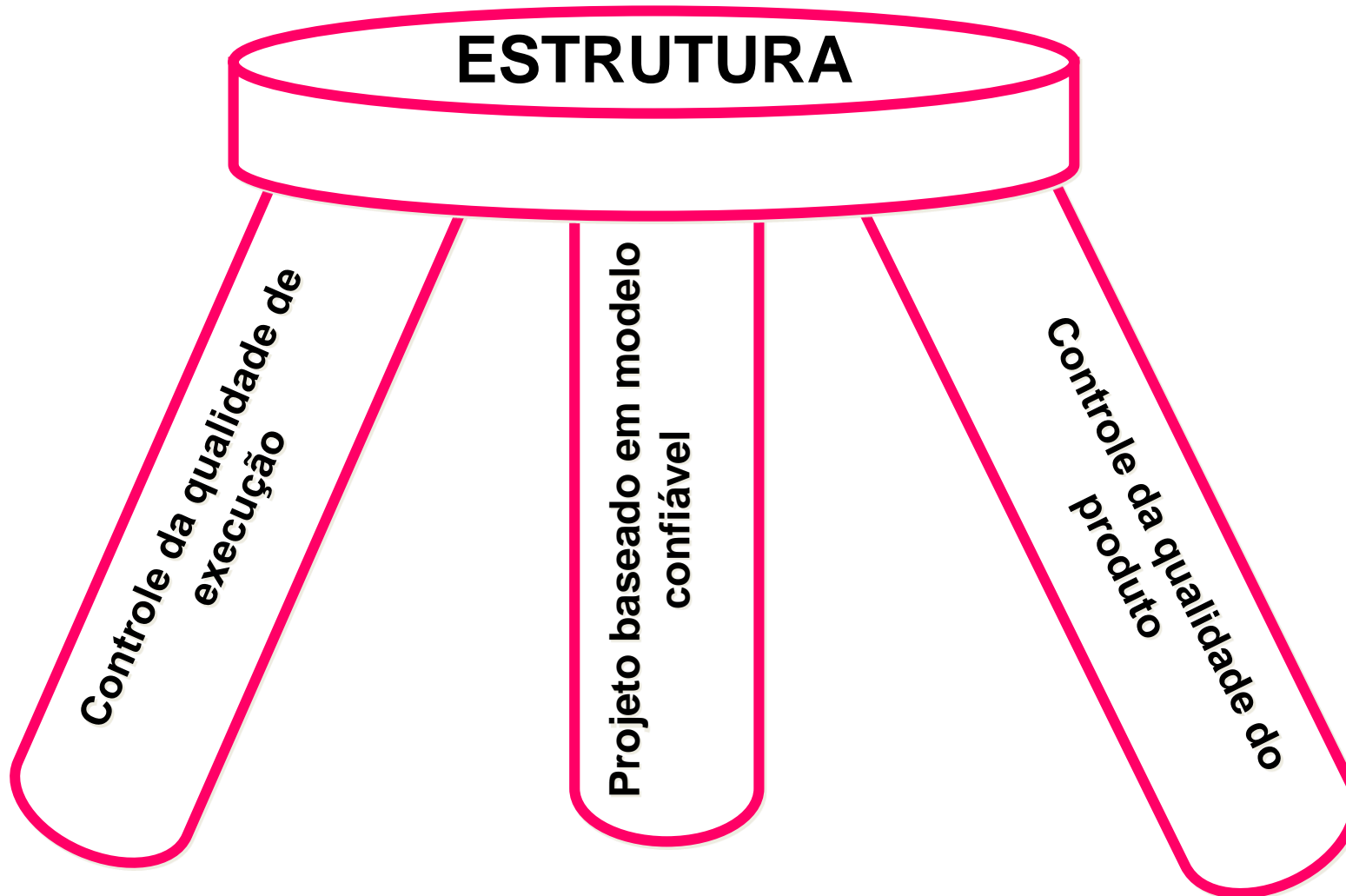


**Model Code 2010.  
Bulletins 55 y 56**



Agora temos um conjunto de normas  
brasileiras para tratar do assunto.  
A principal é a **NBR 16935 – Projeto  
de estruturas de concreto reforçado  
com fibras - Procedimento**

# O uso do CRF em aplicações estruturais: o “tripé da engenharia”

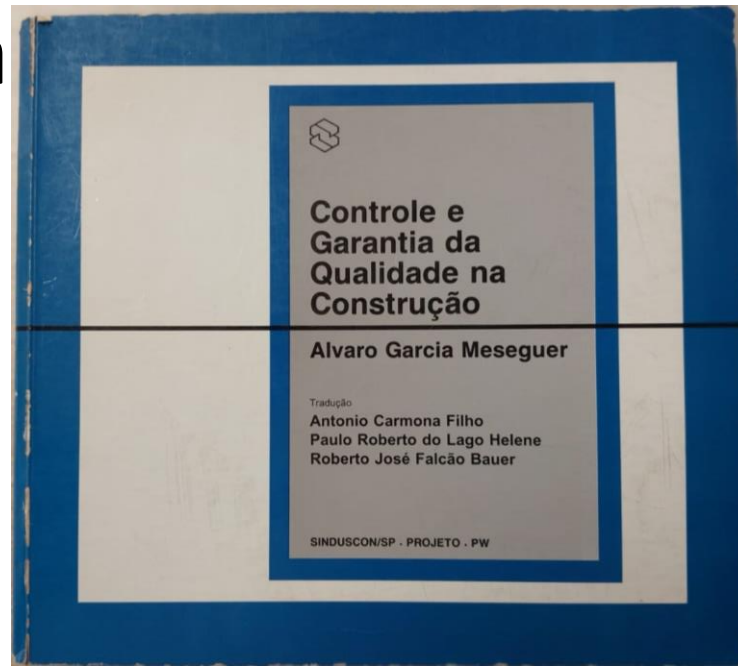


Modelos  
precisam ser  
validados!  
Quais?

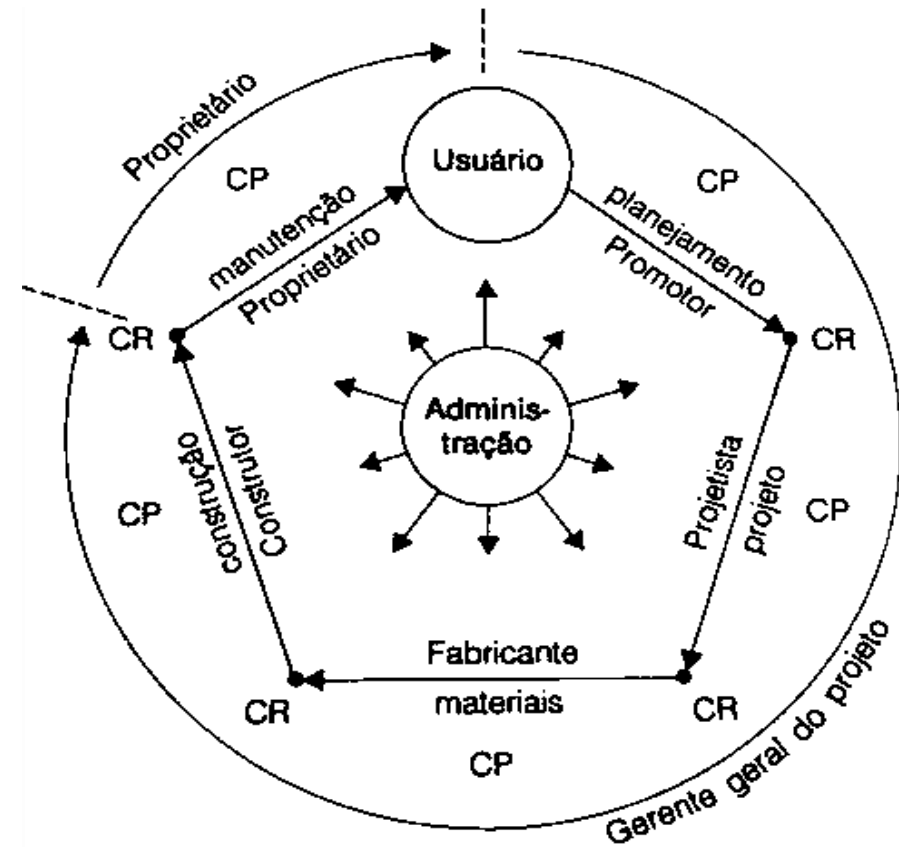


# Controle da qualidade é um fundamento da engenharia:

- Deve haver instrumentos que certifiquem que as premissas de projeto sejam atendidas na obra



*Modelo simplificado do processo construtivo*



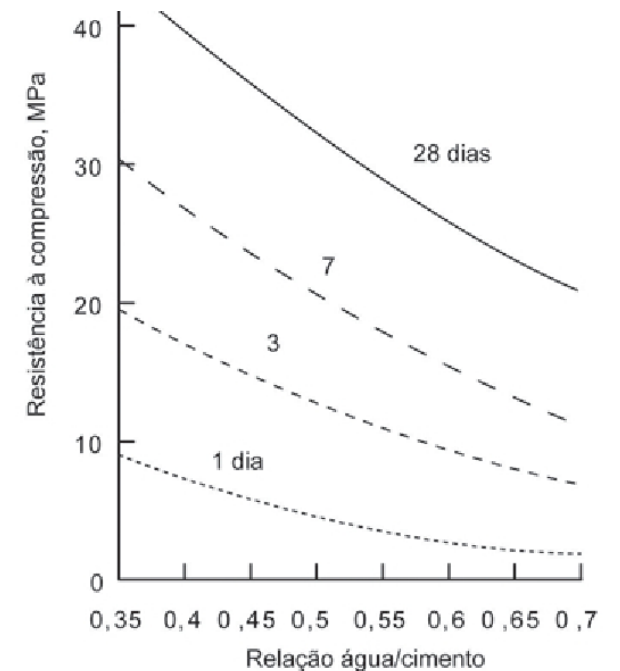
Fonte: Meseguer, A. G. Controle e Garantia da Qualidade na Construção. 1991.

A resistência da estrutura é “igual” à dos corpos de prova?



# Corpos de prova

- Ensaio de compressão é um procedimento padrão que depende de:
  - Forma de adensamento *padronizado*
  - Condições de preparo de superfície *padronizadas*
  - Cura *padrão*
  - Dimensões *padronizadas*
  - Condição de saturação *padronizada*
  - Idade de ensaio *padronizada*
  - Velocidade de ensaio *padronizada*
- As **condições de realização do ensaio** são ***padronizadas***.



**Pilares não atendem a estes padrões**

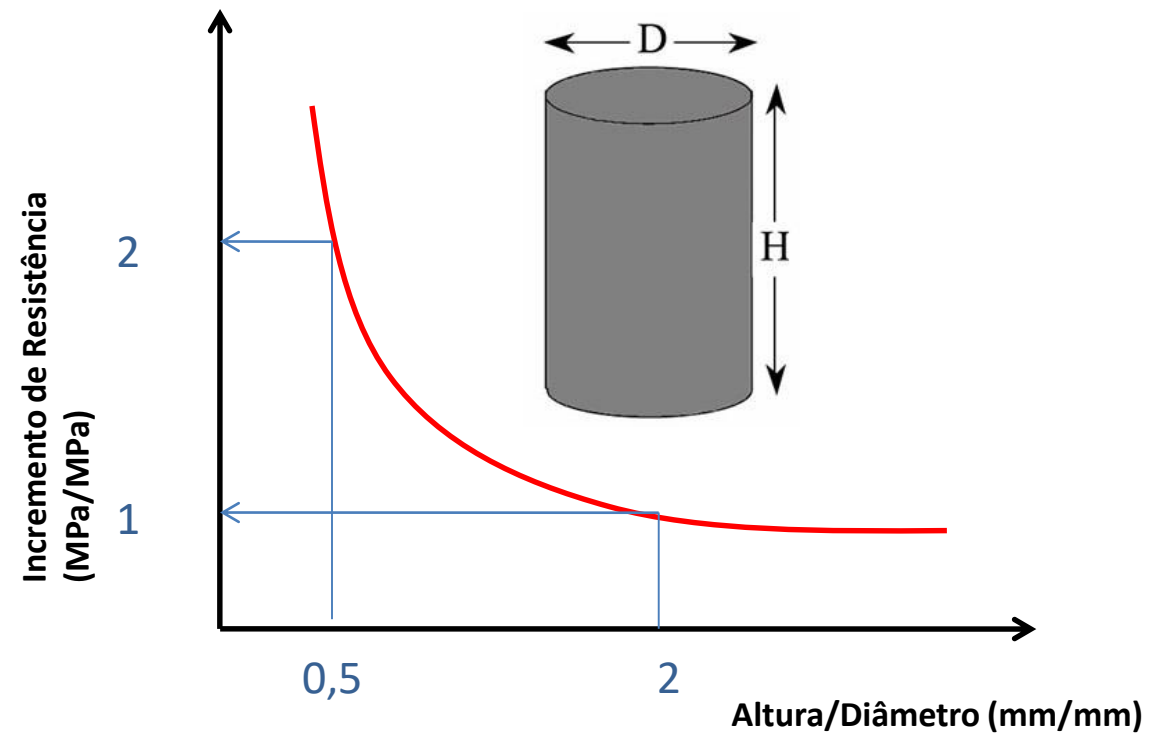
# Efeito da geometria

- Se ao invés de moldar um cilindro moldássemos um cubo para avaliar a resistência?

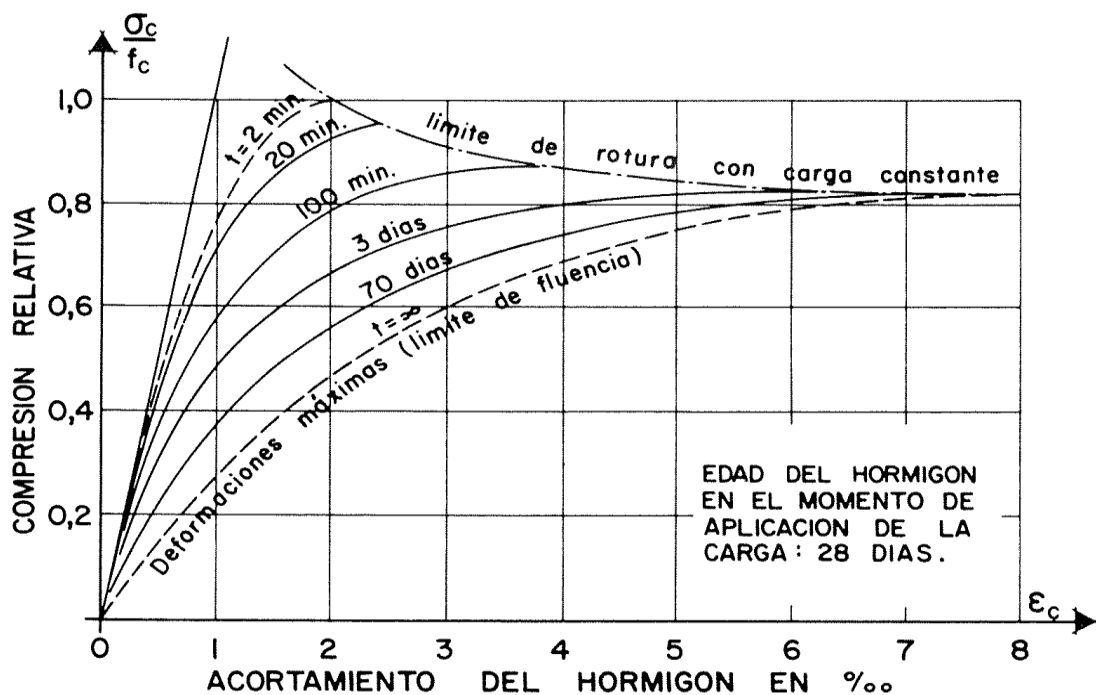


$$f_{C\text{cilindro}} \approx 0,8 f_{\text{cubo}}$$

- Relação altura/diâmetro?

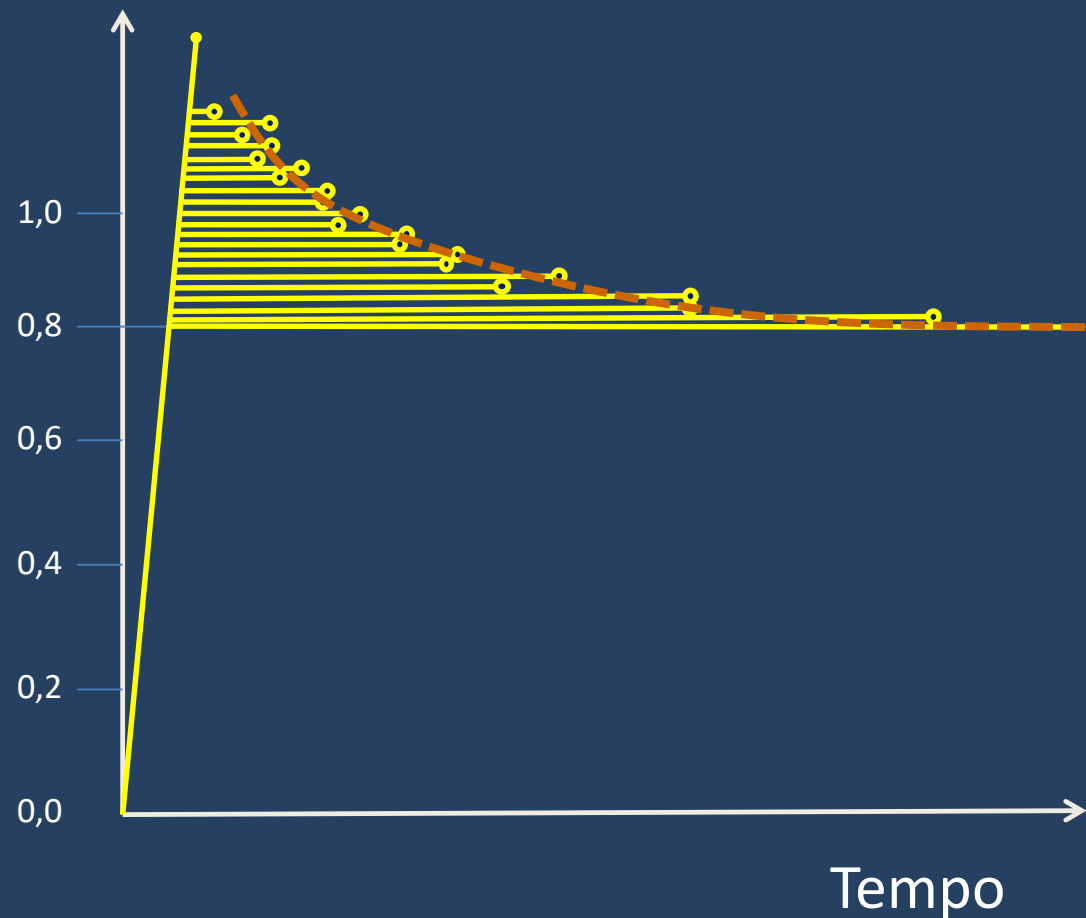


Se mudar a velocidade de carregamento o que acontece?



Efeito Rüsç  
(ruptura por carga mantida)

Relação  $f_c$  padrão/ $f_c$  com carga de longa duração



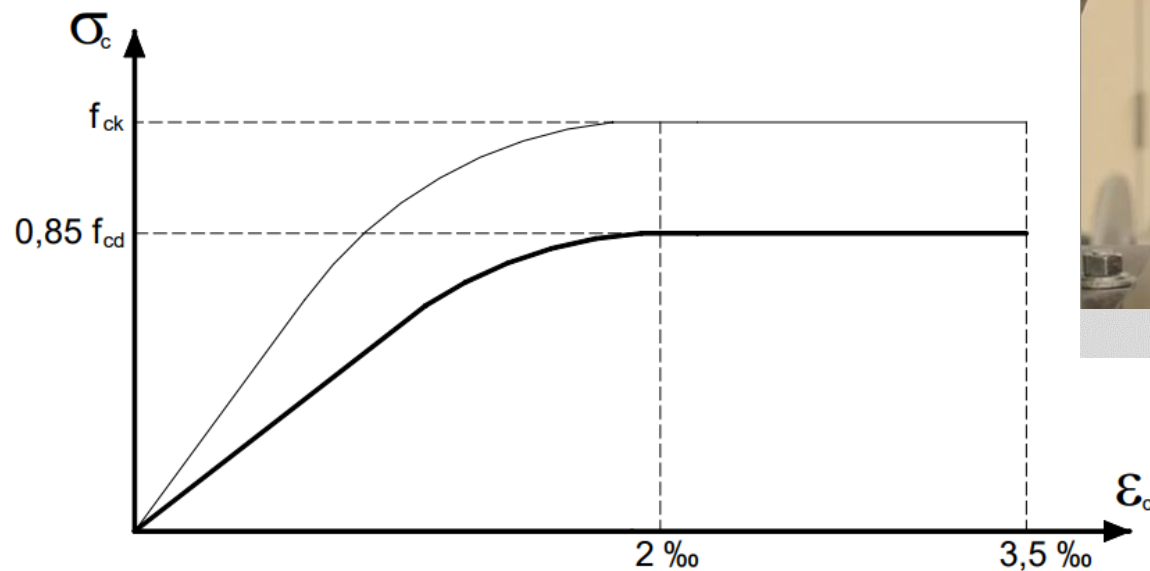
# A consideração em projeto (FUSCO, 2012)

- $f_{1cd} = 0,85 f_{cd}$
- Dentro do 0,85 temos “o efeito de forma, do ganho de resistência após 28 dias e a perda de resistência do concreto submetido a cargas de longa duração”.
- Valores:
  - Formato do corpo de prova: 0,95
  - Ganho de resistência pós 28 dias: 1,20
  - Ruptura por carga mantida de longa duração: 0,75
  - $f_{cc, estrutura} = 0,95 \times 1,2 \times 0,75 f_{cd} = 0,85 f_{cd}$



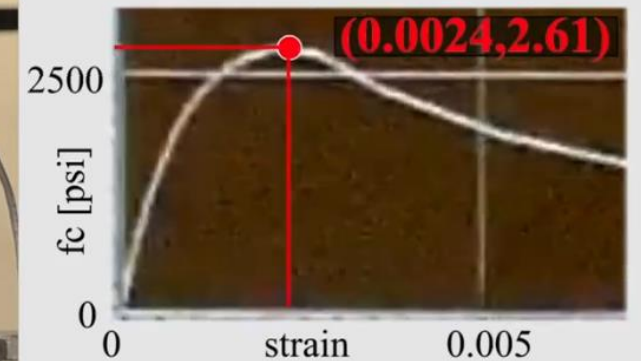
# Parâmetros para o dimensionamento

- $f_{ck} = f_{cm} - 1,65.sd$
- $f_{cd} = f_{ck} \div \gamma_c = f_{ck} \div 1,4$
- Projeto:  $0,85 f_{cd}$



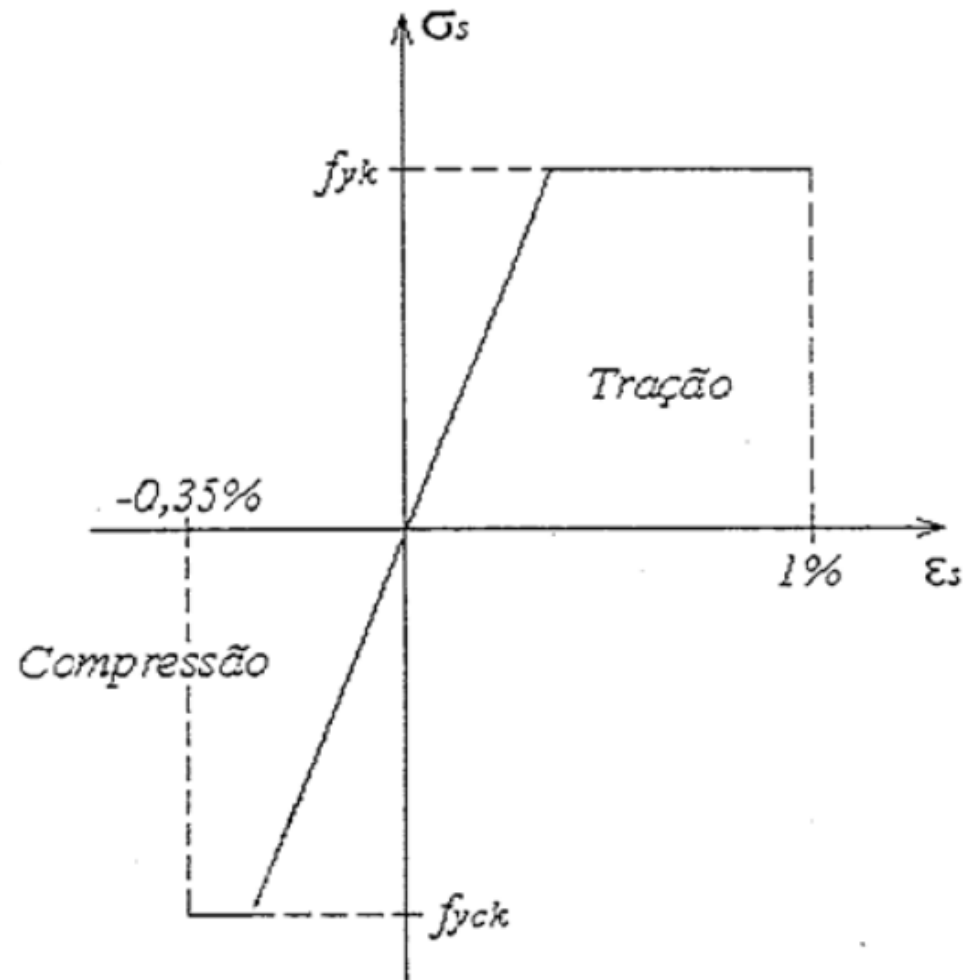
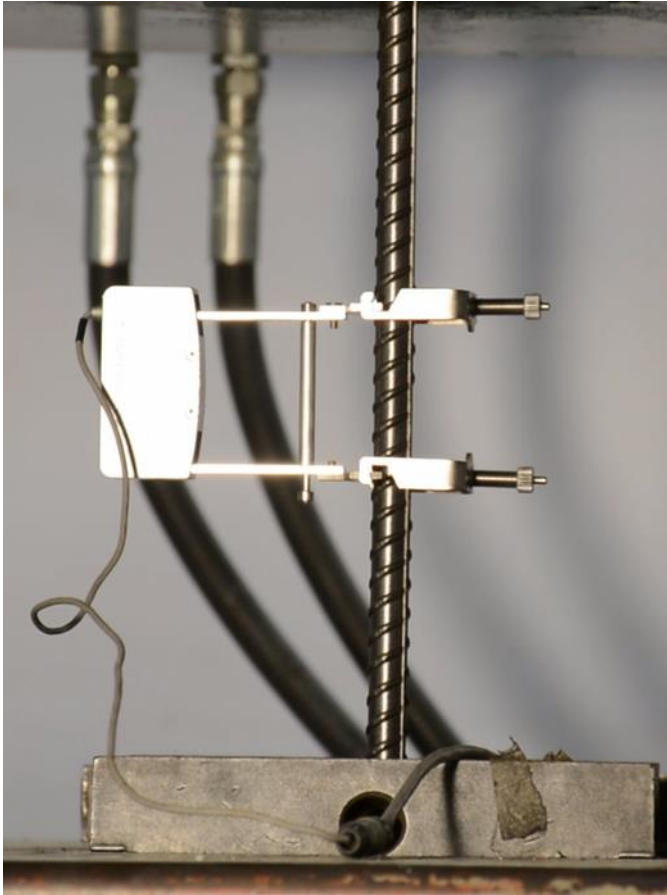
Stress-strain curve

Early age concrete  
(4 days)



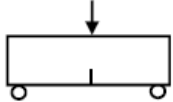
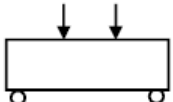



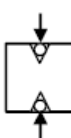
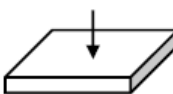

# E o aço?

- $f_{yd} = f_{ykd} = f_{yk} \div \gamma_s$

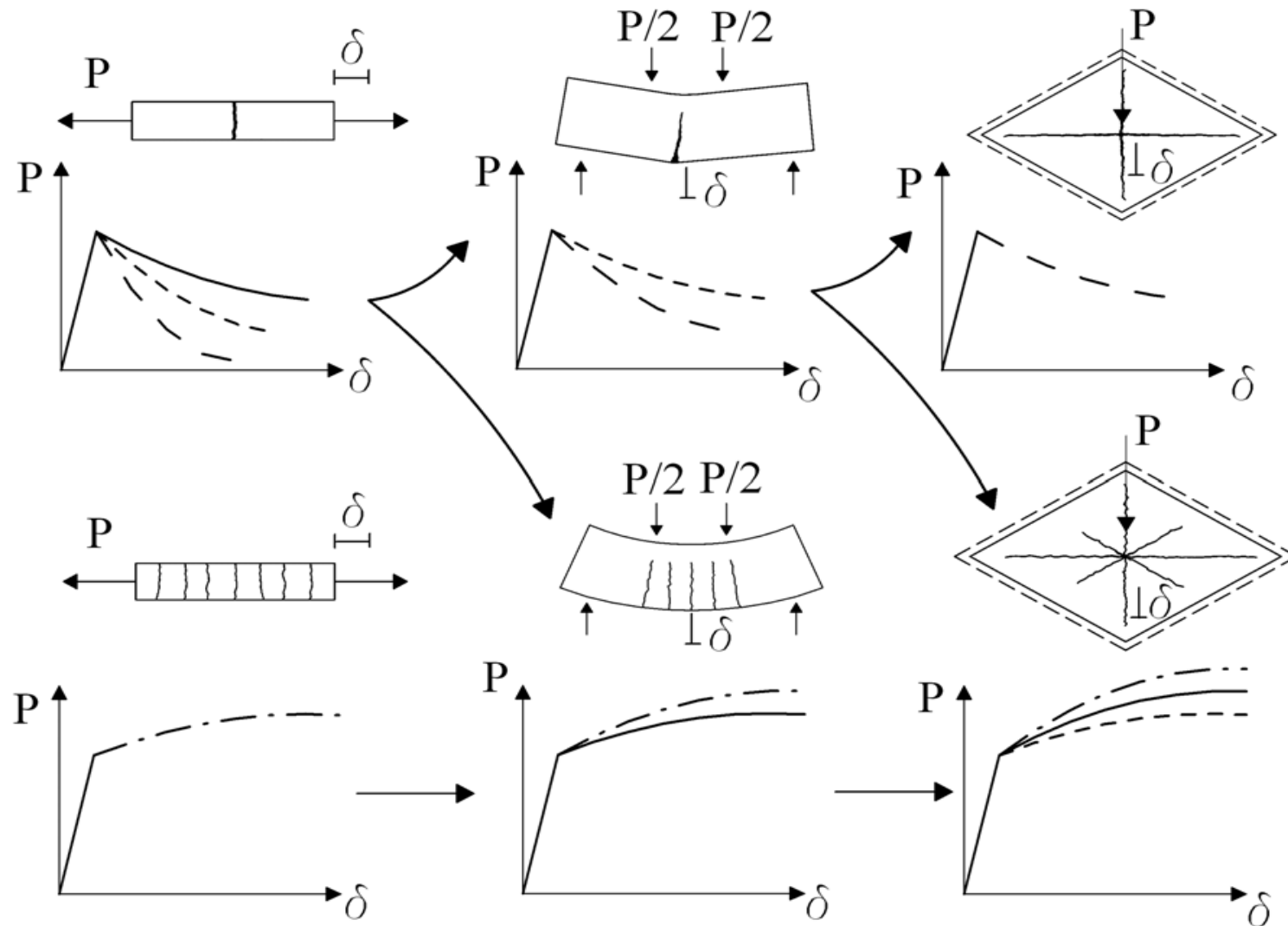




# Principais métodos de ensaio para o comportamento pós-fissuração do CRF

Test	Standard / Reference	Setup	Dimensions <sup>1</sup> [mm]
3-point bending test	EN 14651:2005		600 x 150 x 150
4-point bending test	NBN B 15-238		600 x 150 x 150
Uniaxial tensile test	RILEM TC 162-TDF recommendations		Φ150 x 150
Wedge-splitting test	Tschegg and Linsbauer (1986)		150 x 150 x 150
Barcelona test	UNE 83515:2010		Φ150 x 150
Double-edge wedge splitting test	di Prisco <i>et al.</i> (2010)		150 x 150 x 150
EFNARC panel test	EFNARC European Specification for Sprayed Concrete		600 x 600 x 10
Round panel test	ASTM C1550 - 10a		Φ800 x 75

# Diferenças de resposta em função da sollicitação durante o ensaio

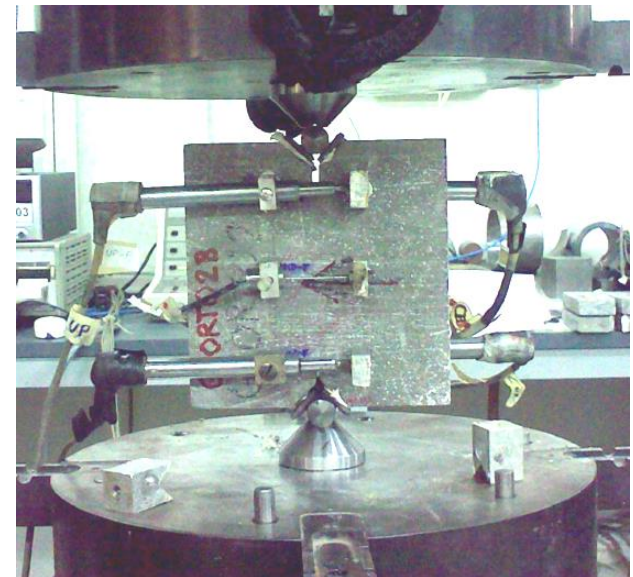


# Qual seria o melhor ensaio para obtenção de leis constitutivas? Tração uniaxial?

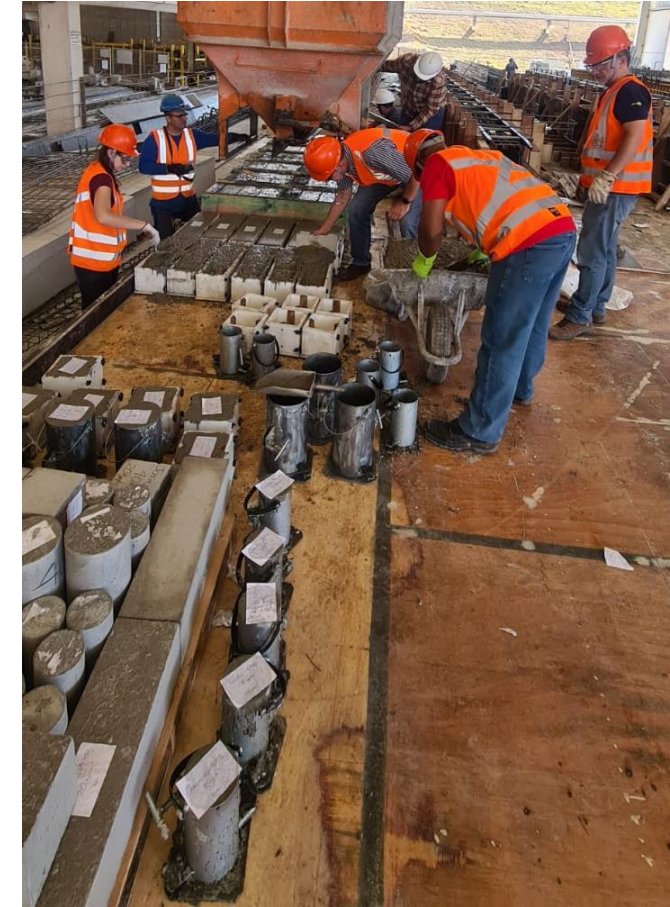
- (*dog-bone*) para obter a relação  $\sigma$ - $\epsilon$ :
  - Sem entalhe e divide-se a deformação medida pelo braço de medida do extensômetro.
- Alternativa: DEWS
  - Avalia diretamente na abertura de fissura.
- São ensaios **difíceis**.



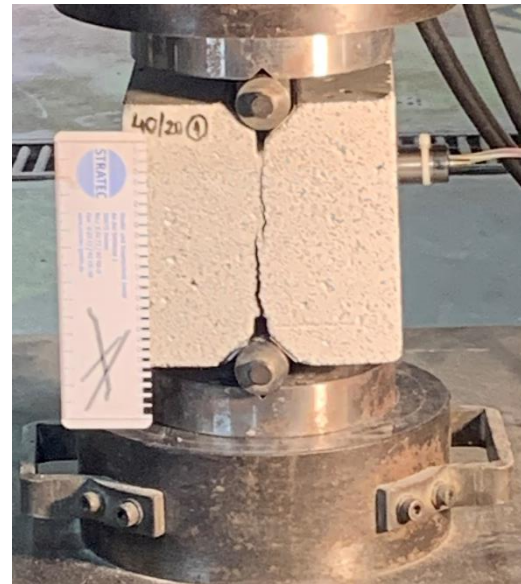
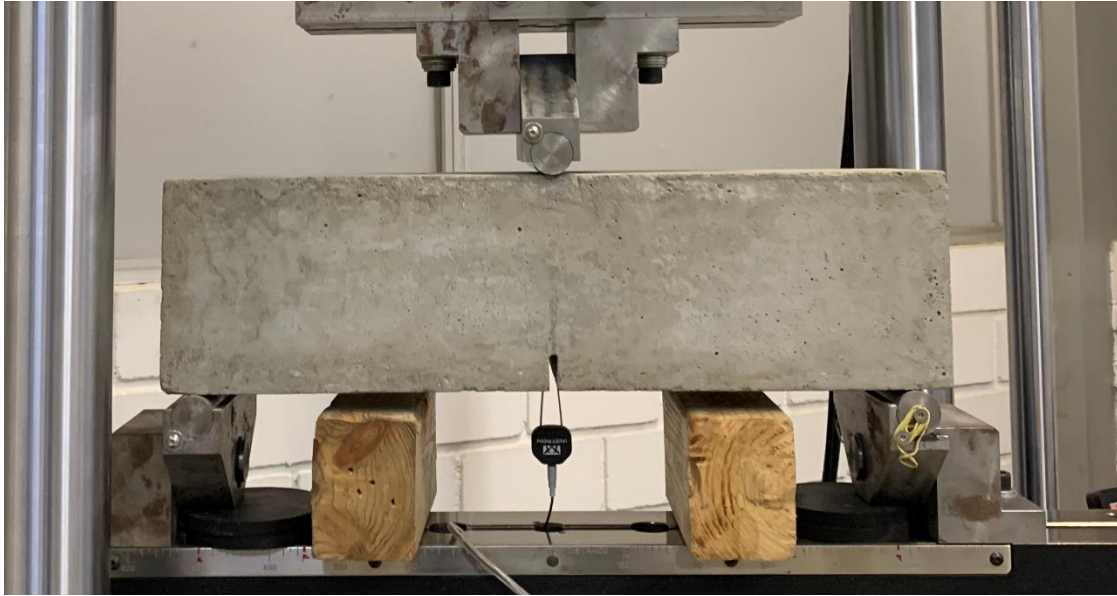
<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~rclab/2frc-e.htm>



# Como os modelos são validados?



# Como os modelos são validados?

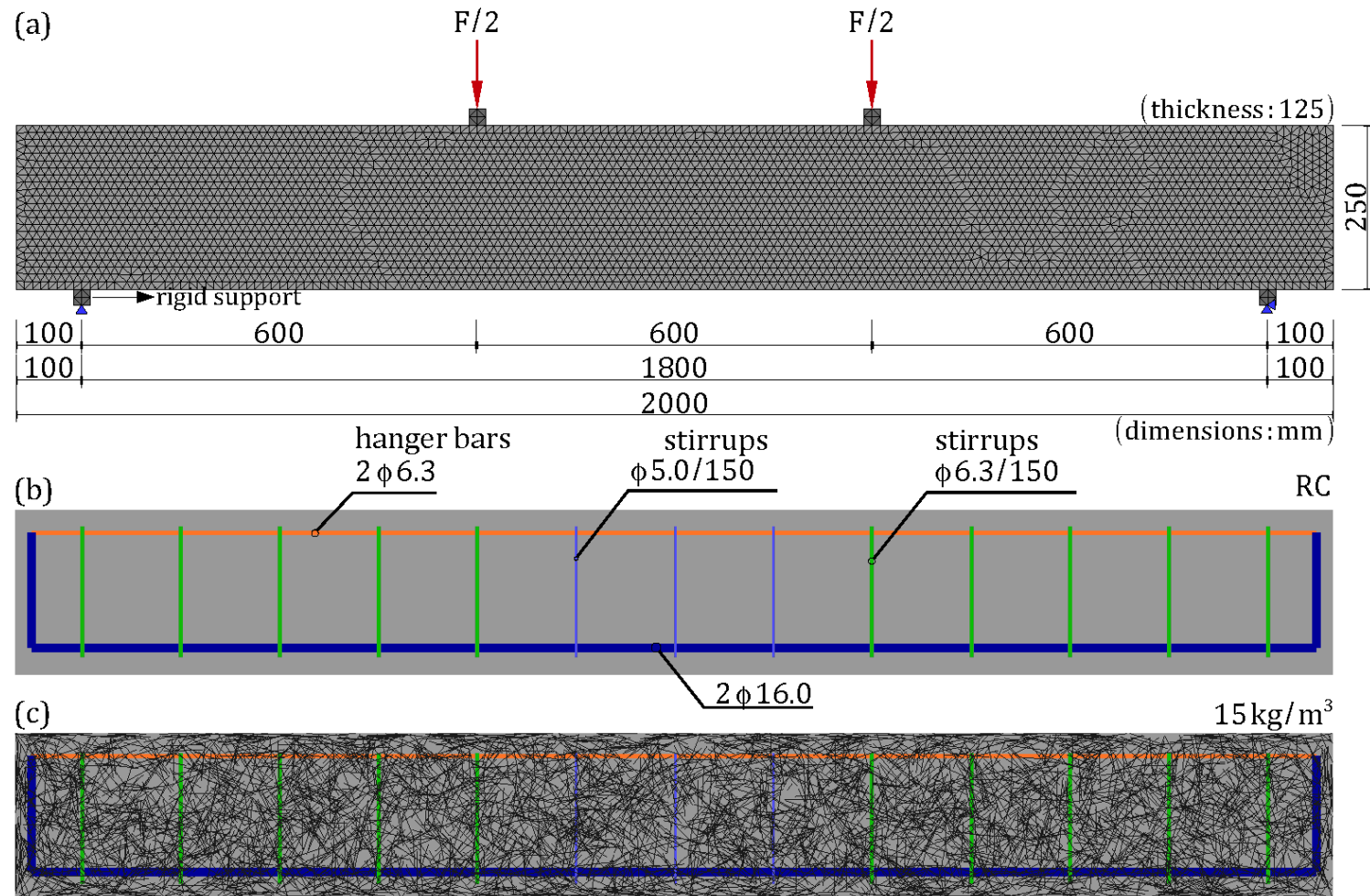


# Como os modelos são validados?



# Avaliação do comportamento do elemento estrutural

## Modelagem computacional



# Avaliação do comportamento do elemento estrutural

## Modelagem computacional

*Concreto armado convencional*

Fator de escala: 3



# Avaliação do comportamento do elemento estrutural

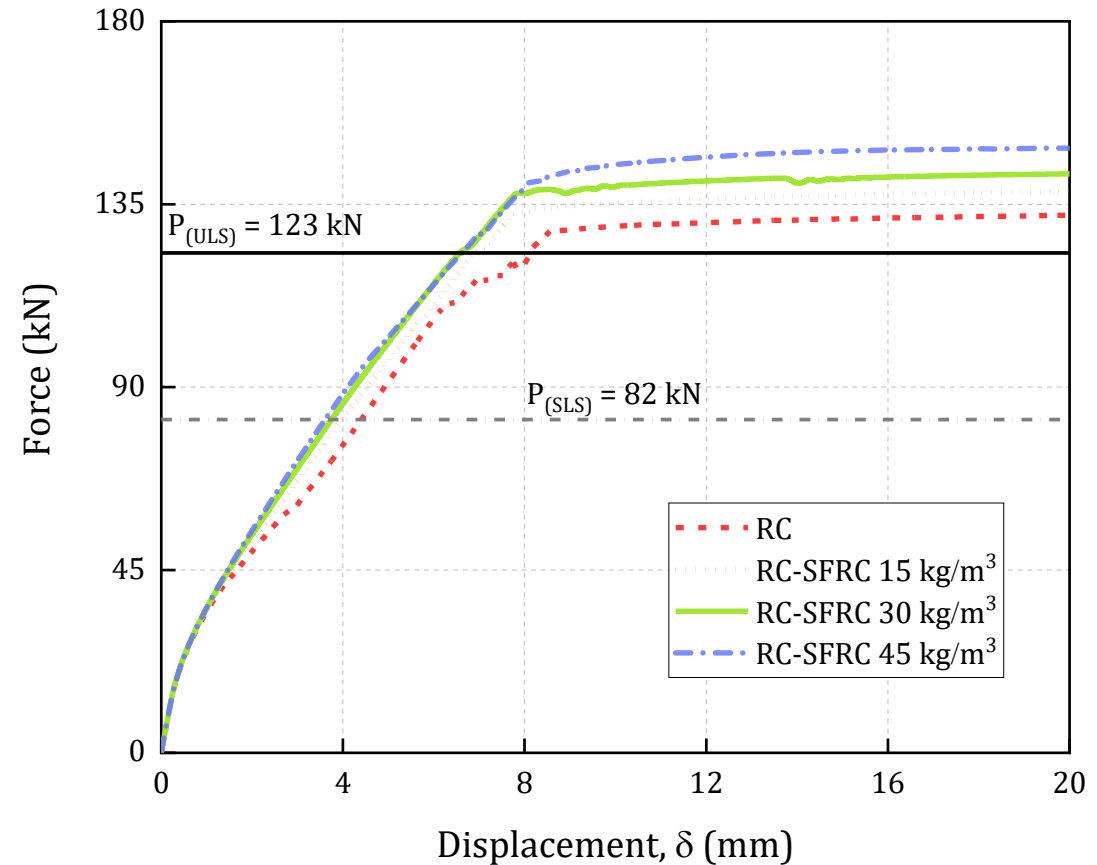
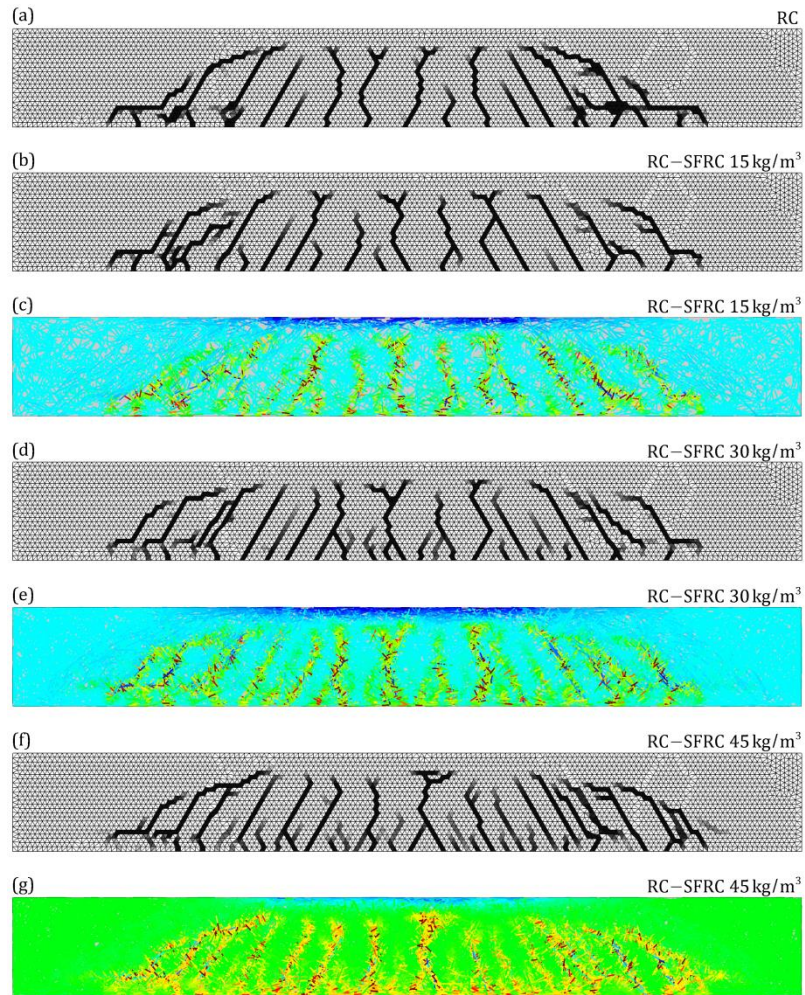
## Modelagem computacional

*RC-SFRC 30kg/m<sup>3</sup>*



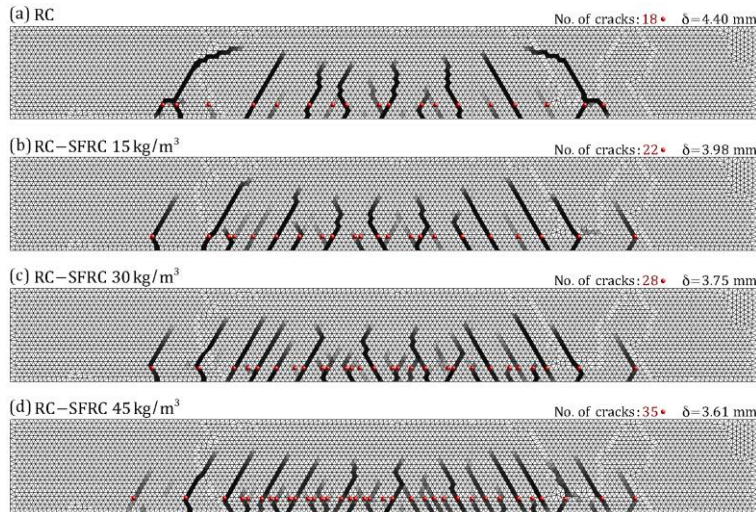
Fator de escala: 3

# Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC



# Previsão do comportamento das vigas de RC-SFRC

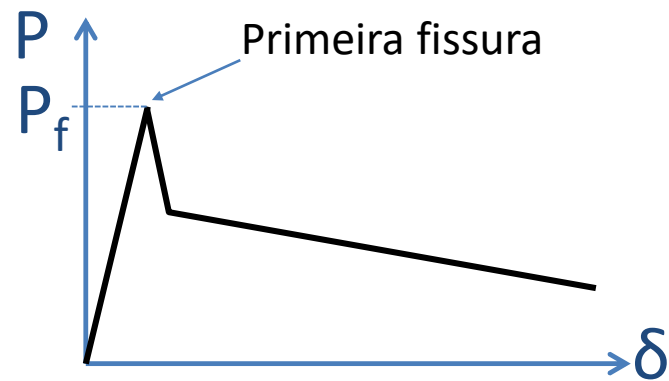
## fib Model Code 2010 x análises numéricas



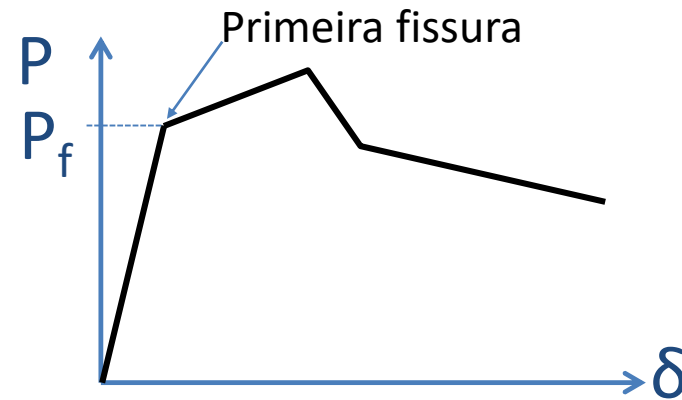
Beam	$w_{num}$ (mm)	$w_{MC2010}$ (mm)	$s_{rm,num}$ (mm)	$s_{rm,MC2010}$ (mm)	$\delta_{SLS,num}$ (mm)	$\delta_{SLS,MC2010}$ (mm)
RC	0.34	0.26	69	76	4.40	4.31
RC-SFRC 15 kg/m <sup>3</sup>	0.24	0.18	62	58	3.98	4.03
RC-SFRC 30 kg/m <sup>3</sup>	0.12	0.14	48	45	3.75	3.80
RC-SFRC 45 kg/m <sup>3</sup>	0.10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

Importante: integração com modelos de projeto e de controle da qualidade.

# Modelos básicos de comportamento do CRF



(a)



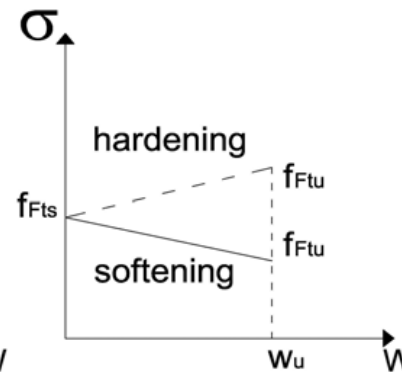
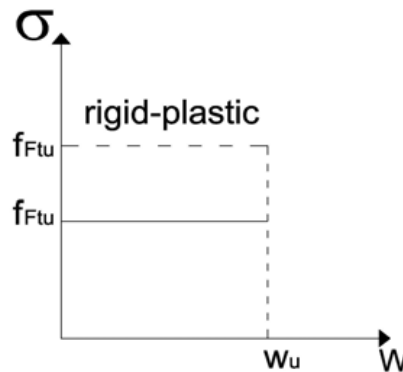
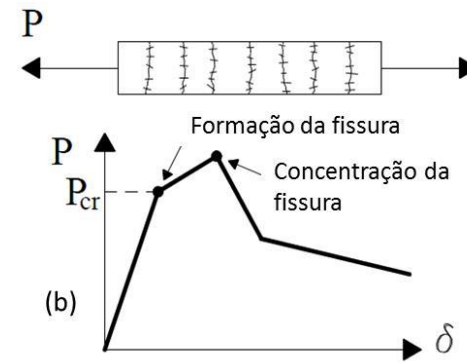
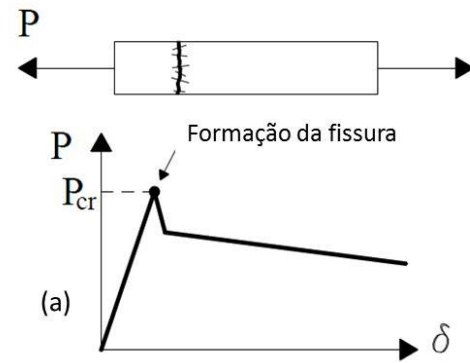
(b)

# Código Modelo *fib* 2010 – NBR 16935

- Comportamentos básicos do CRF



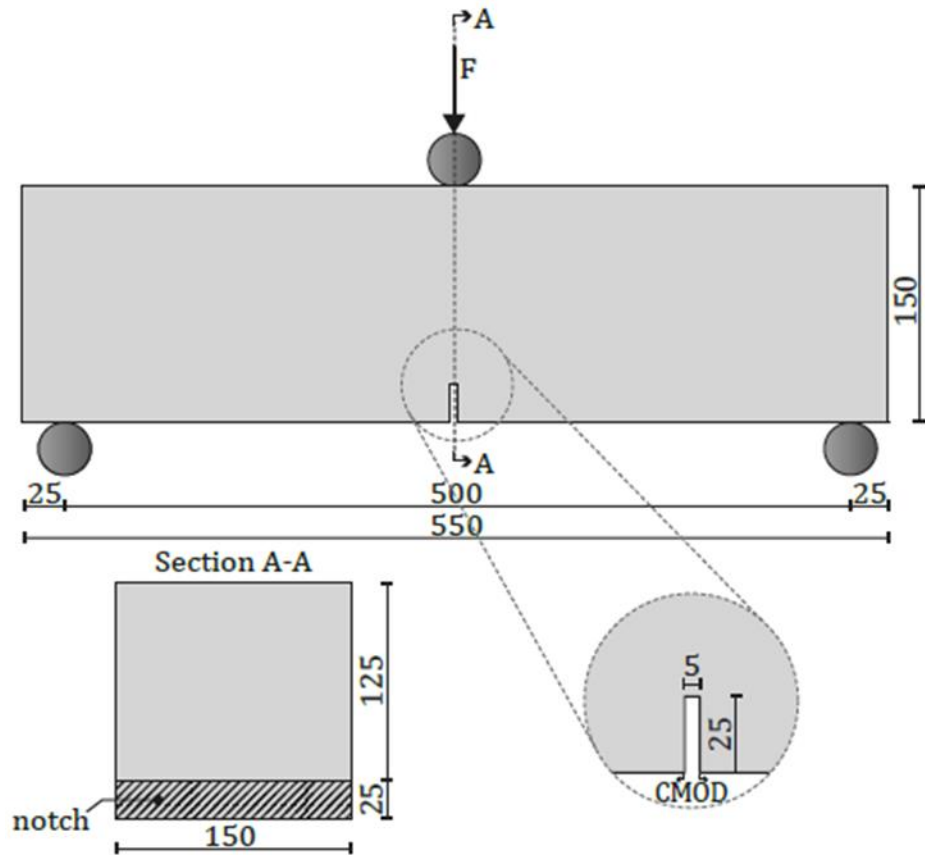
<https://theconstructor.org/concrete/hybrid-fiber-reinforced-concrete/17204/>



<https://www.concretedecor.net/decorativeconcretearticles/vol-7-no-3-may-2007/ductal-concrete-by-lafarge/>

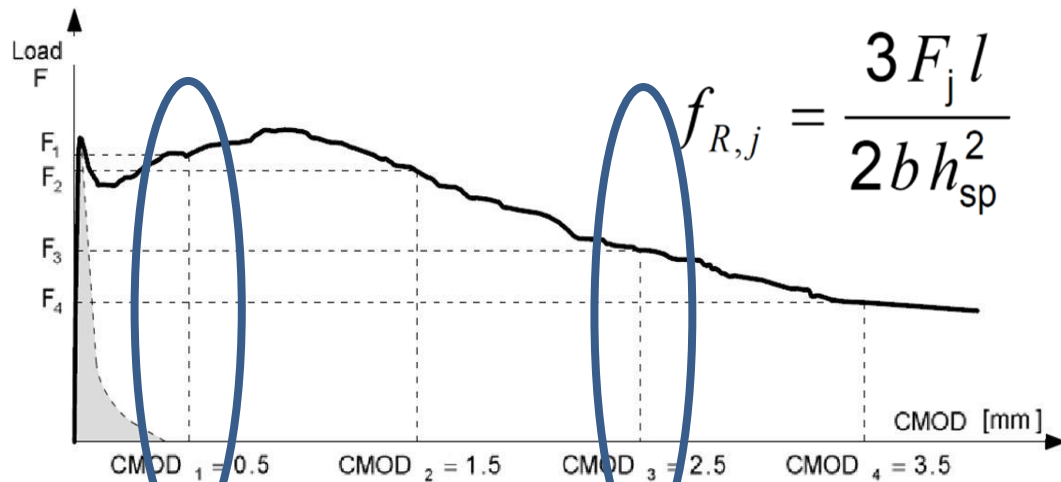
# fib Model Code 2010 e ABNT NBR 16935:2021

- Método básico de controle adotado EN 14651 (2007) ou ABNT 16940:2021



# fib Model Code 2010 ou ABNT NBR 16935:2021

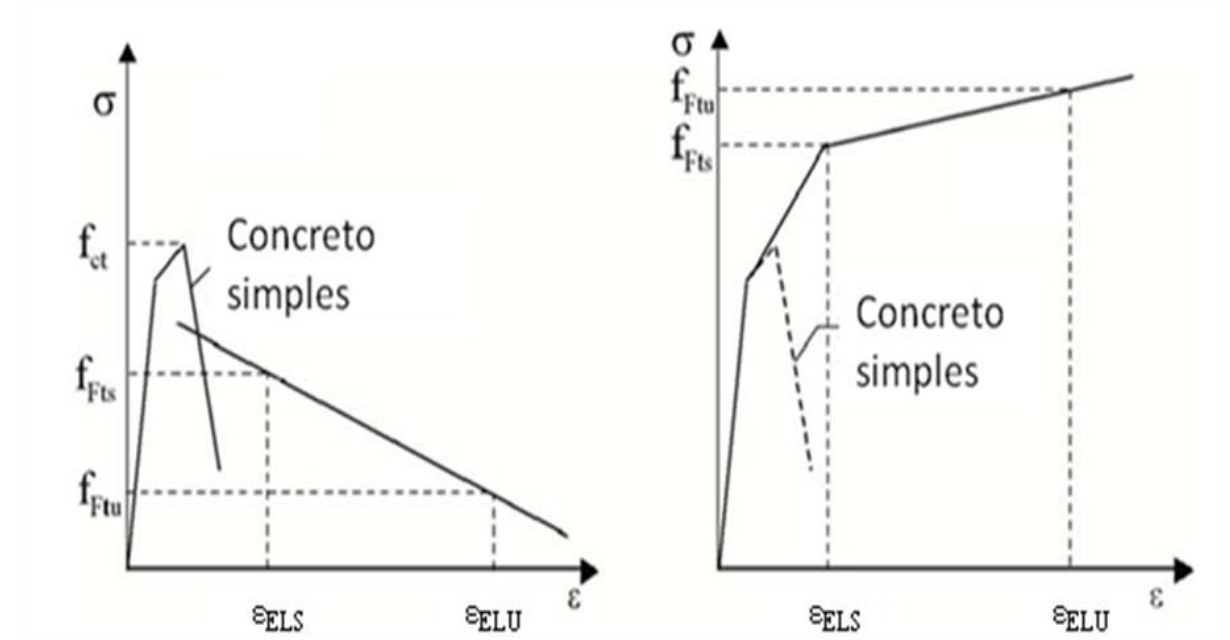
Comportamento básico e equações constitutivas.  
 “A grande solução”!



$$f_{R,j} = \frac{3 F_j l}{2 b h_{sp}^2}$$

ELS

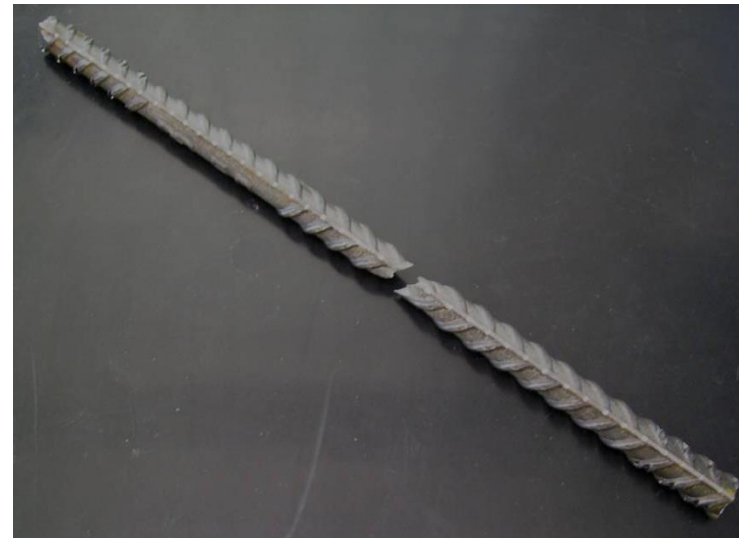
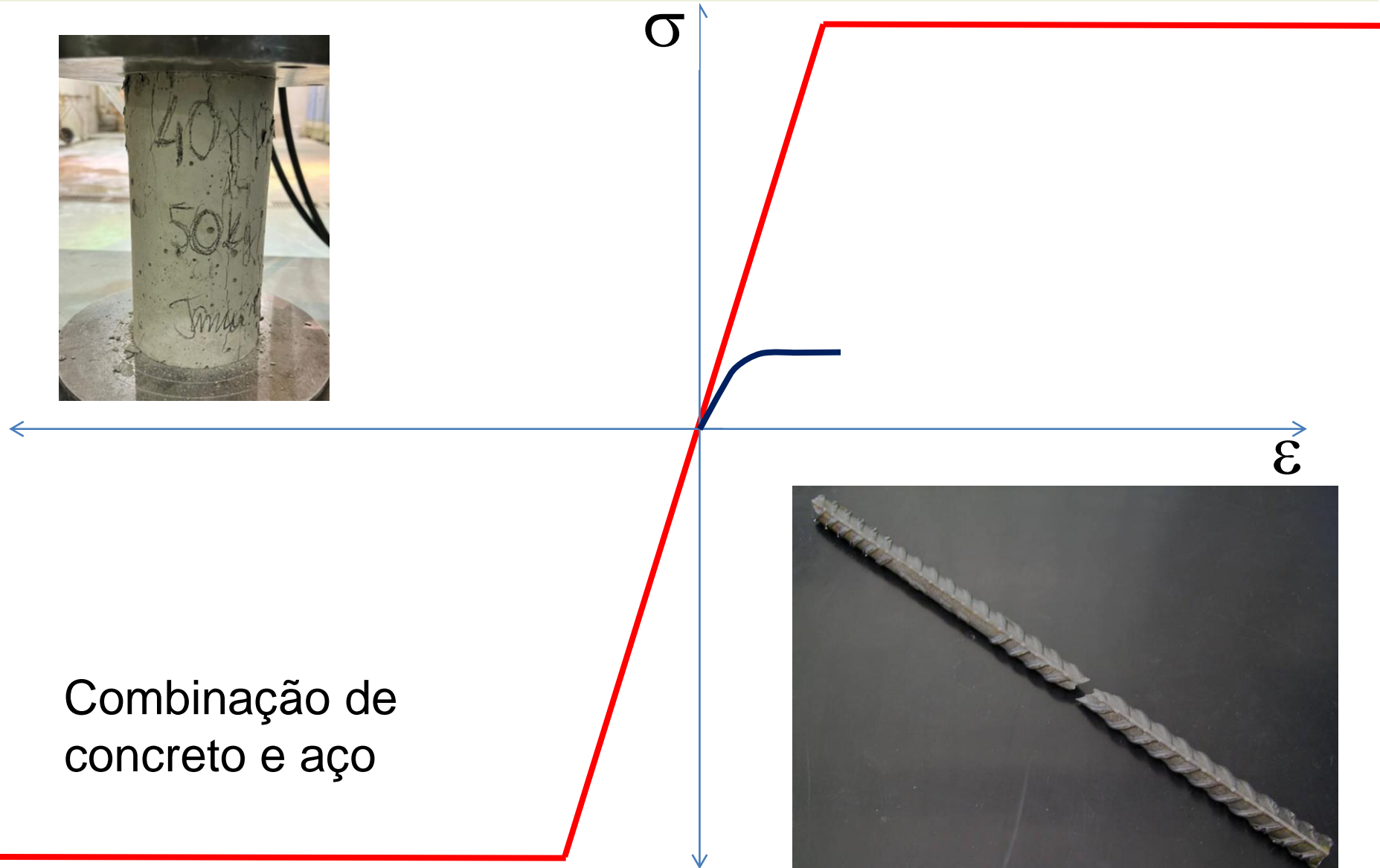
ELU



Strain softening

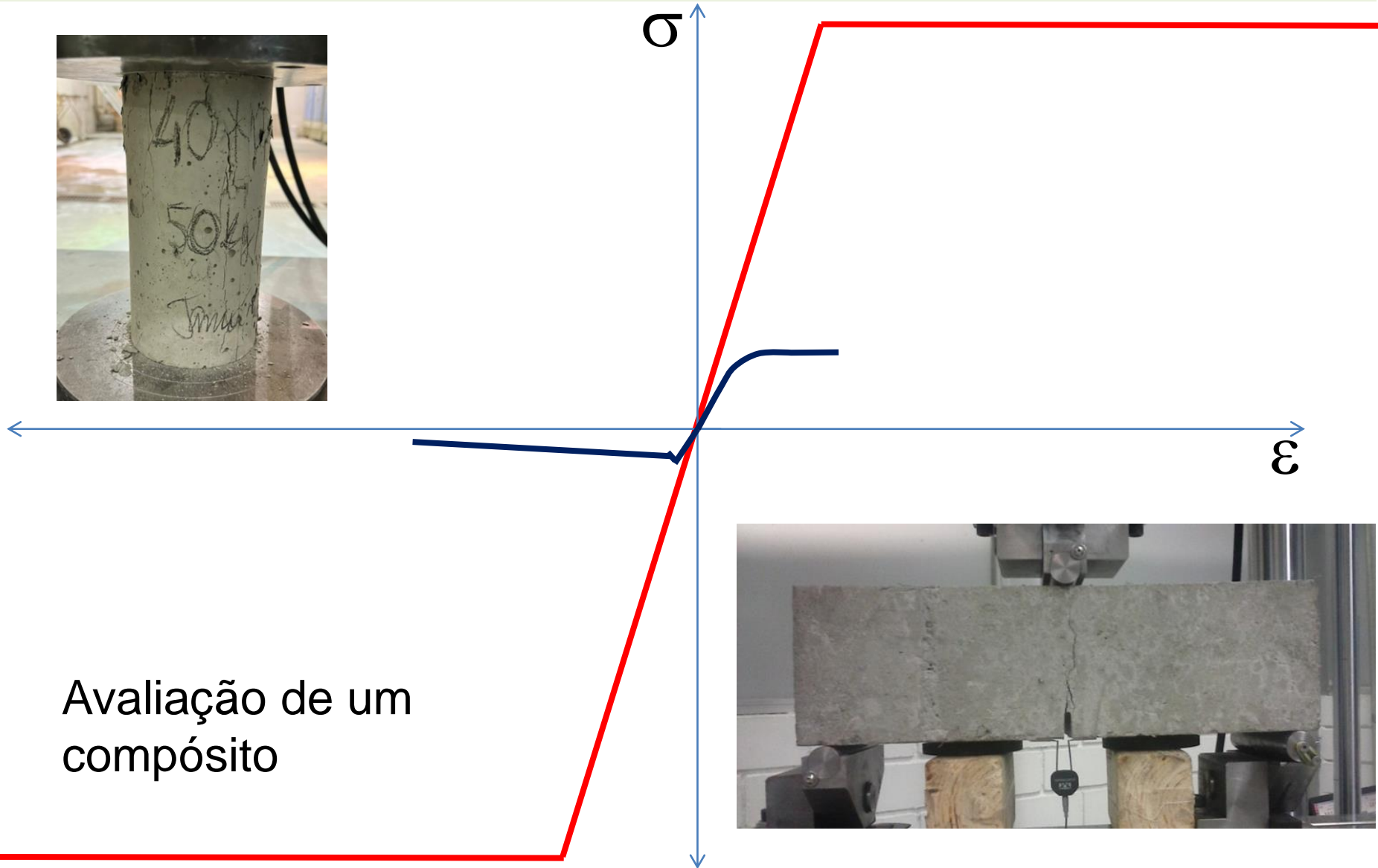
Strain hardening

# A concepção do concreto armado





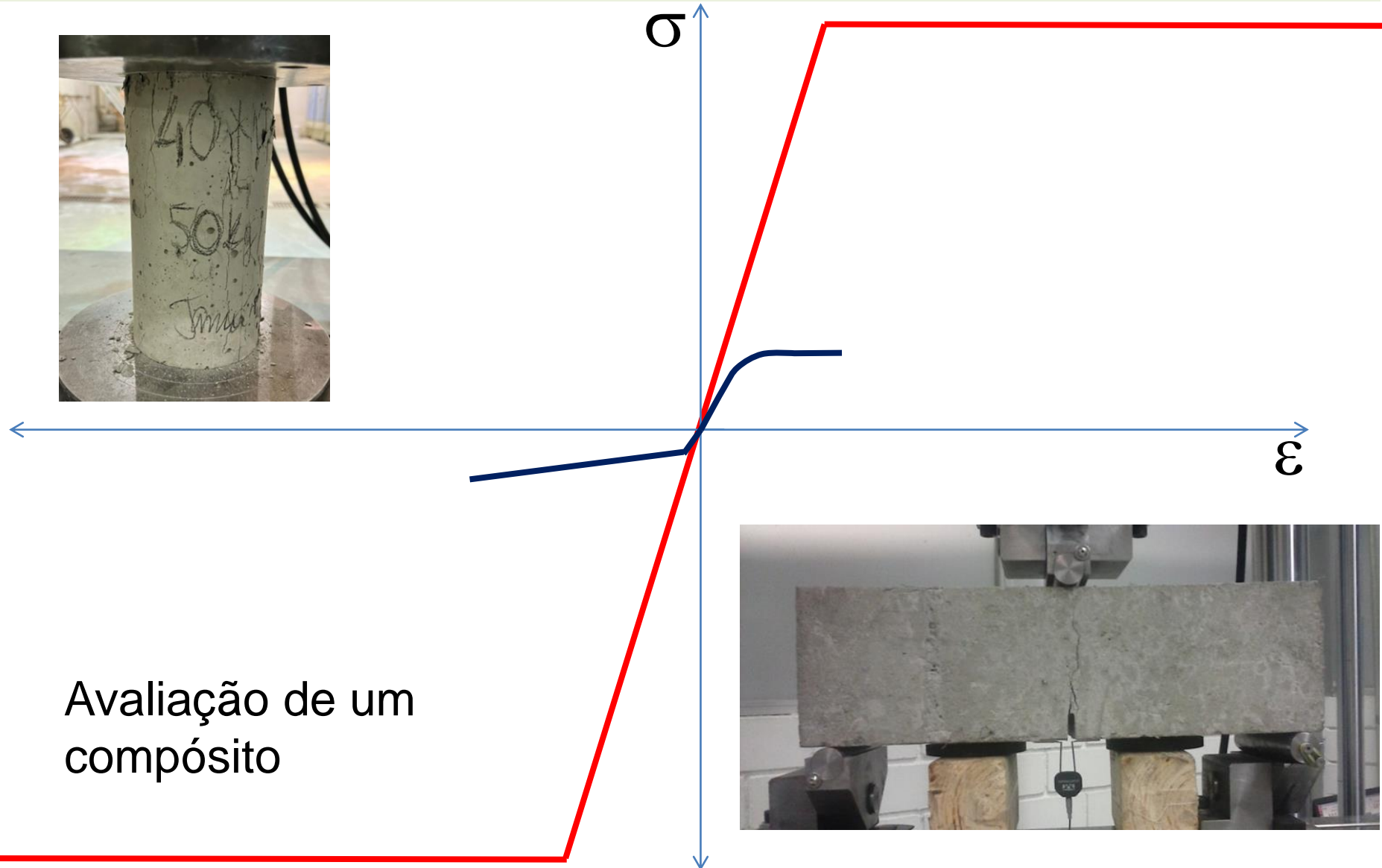
# A concepção do CRF



Avaliação de um compósito



# A concepção do CRF<sub>2</sub>

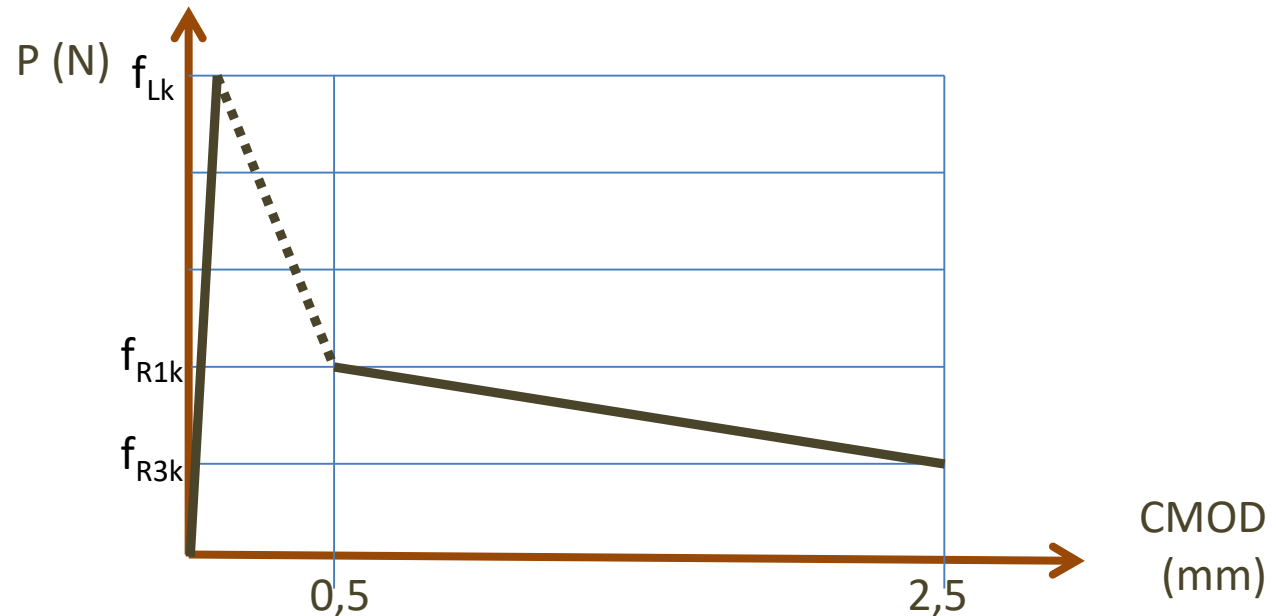


Avaliação de um  
compósito



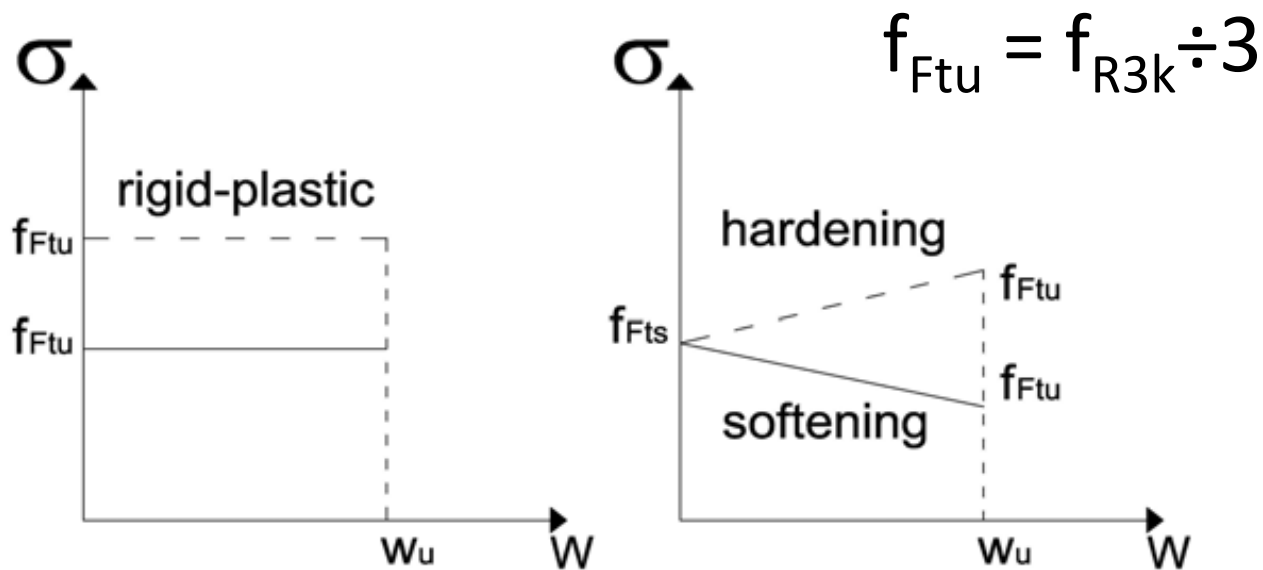
# Condições básicas

- Desde que comportamento frágil deve ser evitado em elementos estruturais, o reforço com fibras pode substituir (mesmo parcialmente) as armaduras convencionais (barras e tela metálica) no ELS se as seguintes relações deverão atendidas:
- $f_{R1k}/f_{Lk} \geq 0,4$
- $f_{R3k}/f_{R1k} \geq 0,5$



# Leis constitutivas para tração uniaxial

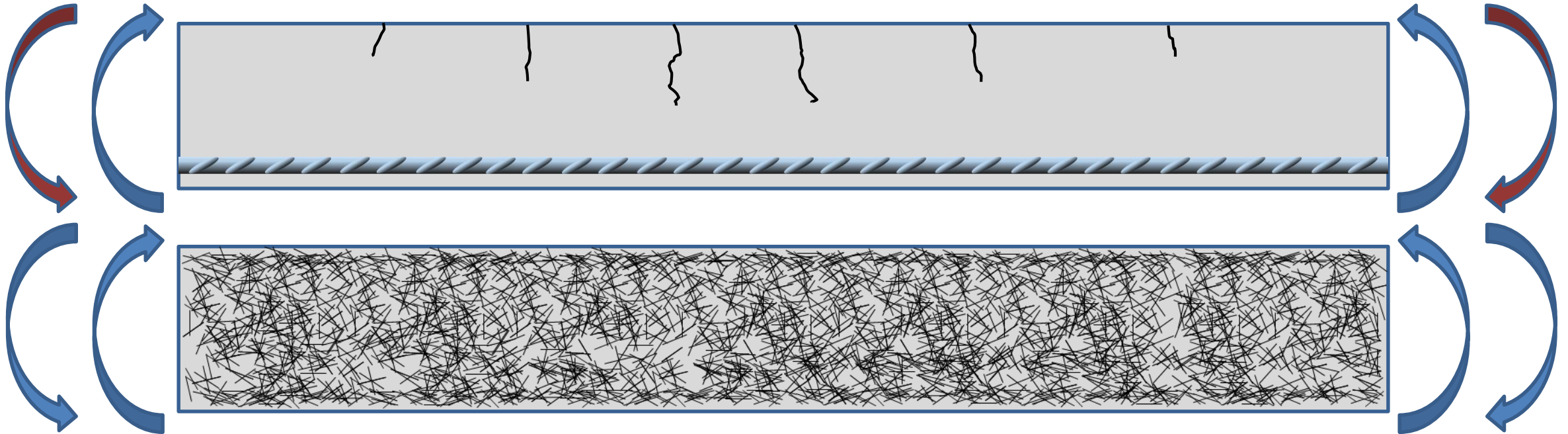
- Duas leis constitutivas simplificadas de tensão por abertura de fissura podem ser deduzidas do ensaio de flexão: o comportamento plástico rígido ou o comportamento linear pós fissuração (hardening ou softening):



- $w_u$  é a abertura de fissura relativa ao ELU:
- $f_{Fts}$  representa a tensão residual de serviço, definida como a resistência pós-fissuração para uma abertura de fissura significativa para o ELS:
- $f_{Ftu}$  representa a tensão residual correspondente ao ELU.
- $f_{Fts}$  e  $f_{Ftu}$  são calculadas usando as tensões residuais  $f_{R1k}$  e  $f_{R3k}$

# Aspectos básicos de projeto

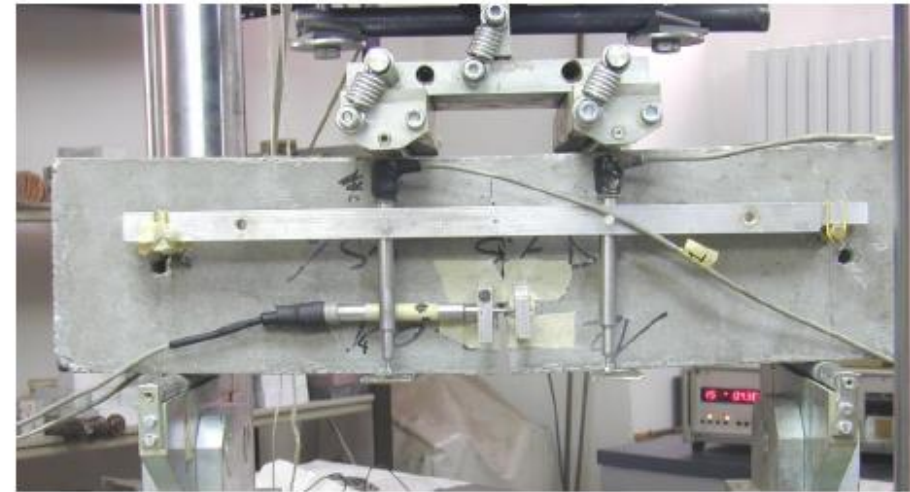
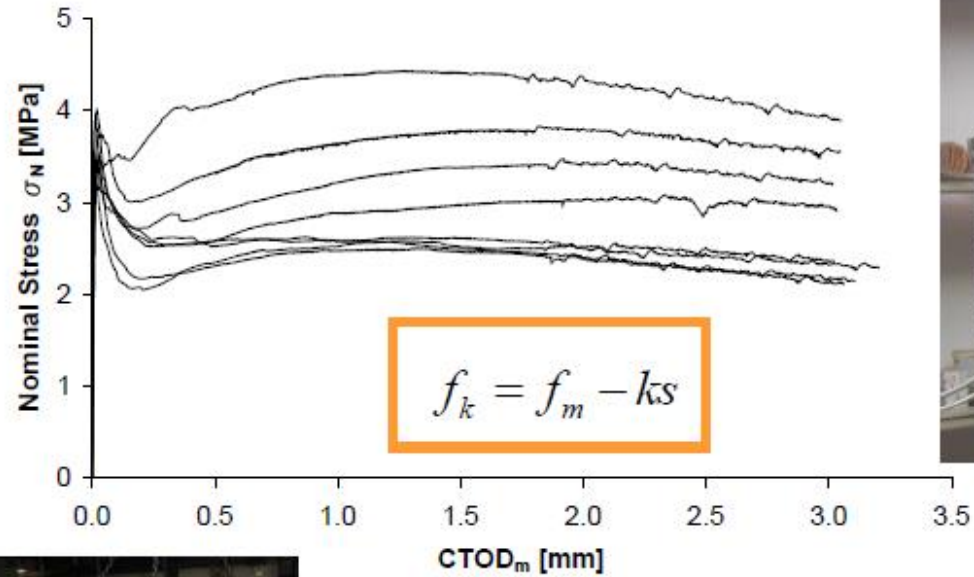
- Reforço de fibras é mais adequado para estruturas onde há tensões difusas.
- Em estruturas com tensões difusas e localizadas (caso usual) o reforço combinado com o convencional de barras e fibras é melhor.



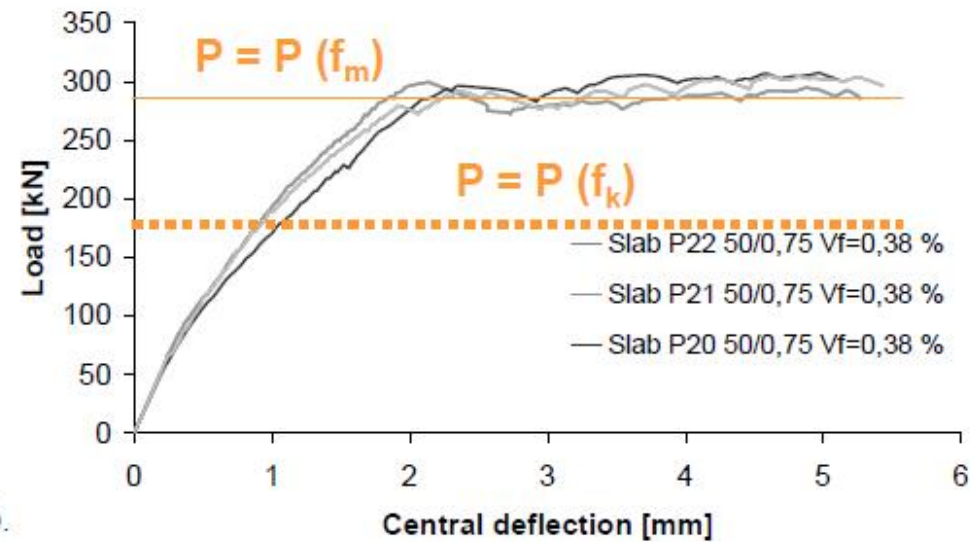
# Aspectos básicos de projeto

- A alta variabilidade do comportamento pós-fissuração no ensaio é frequentemente uma penalização para a tecnologia.
- Quando há redundância significativa na estrutura (geometria e condições de contorno) e um grande volume da estrutura é envolvido no processo de falha, a avaliação experimental pode ser usada para verificação do comportamento médio que será considerado no lugar do característico.

✓ the key role of the scattering



Load vs. Central deflection



li Prisco, M., Failla, C., Plizzari, G.A., Toniolo, G (2004).

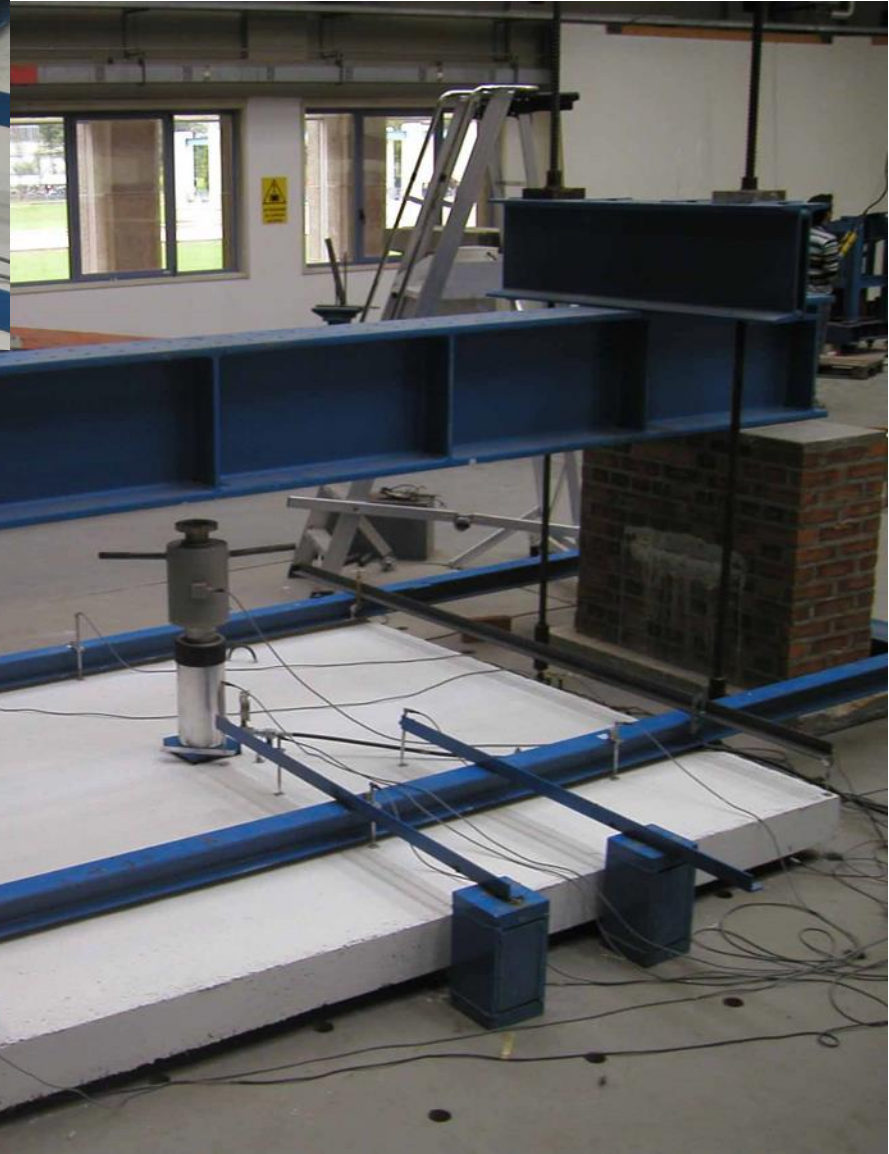
# Avaliação experimental

- Análise experimental com o objetivo de modelagem do comportamento de placas apoiadas sobre base flexível
- “Resumo da ideia” (Belletti, Cerioni, Meda, Plizzari. **Experimental and numerical analyses of FRC slabs on grade** FraMCoS-5. Vail, USA. 2004



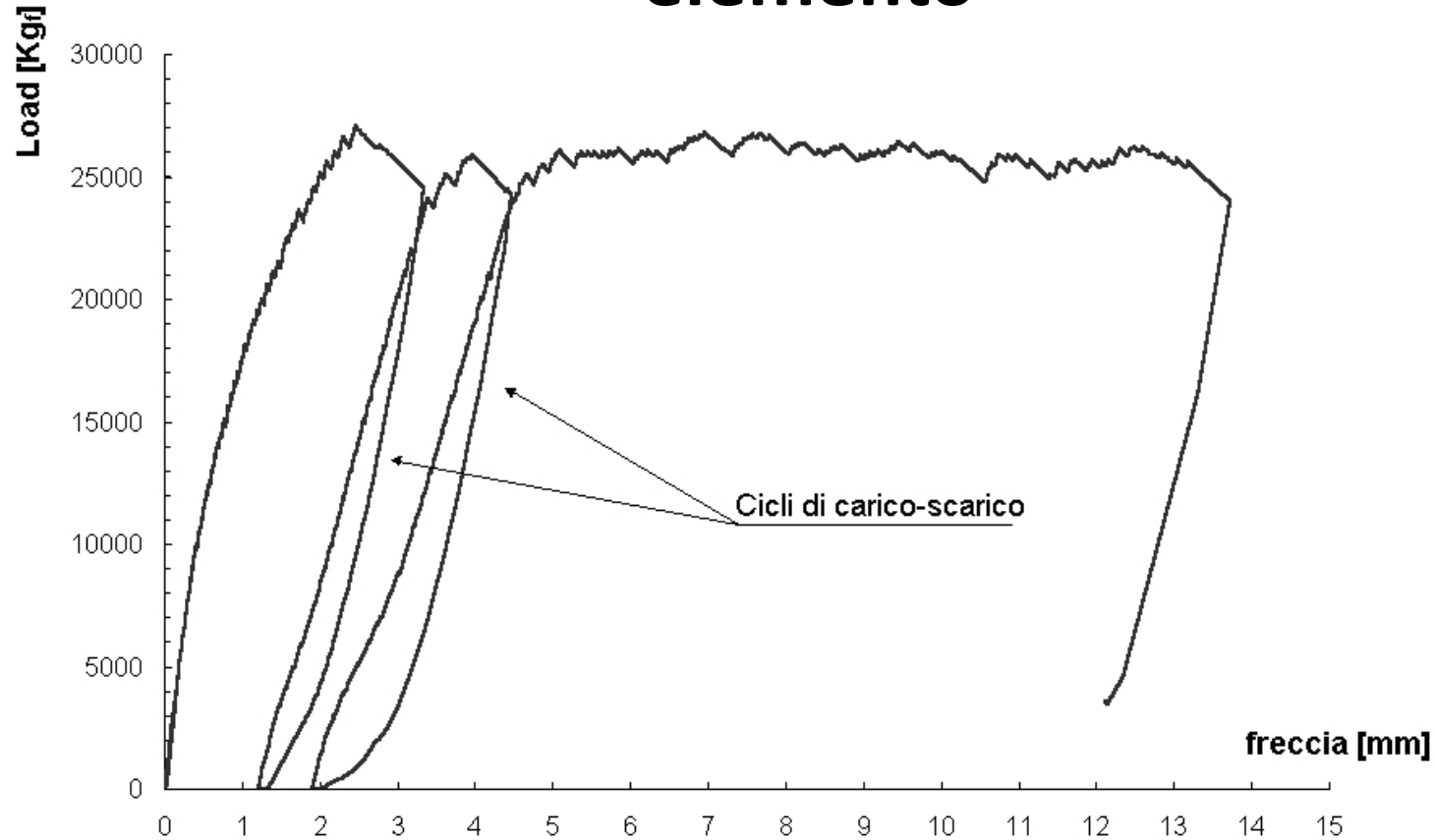








# Garante-se a ductilização do sistema e a possibilidade de trabalhar na fase plástica do elemento



Obrigado pela atenção!

