



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

Programa de Pós-Graduação

**ENGENHARIA CIVIL**

**PCC-5729 Compósitos de  
Matrizes Cimentícias para a  
Construção Civil**

# **Controle e análise experimental do CRF**

Antonio Figueiredo

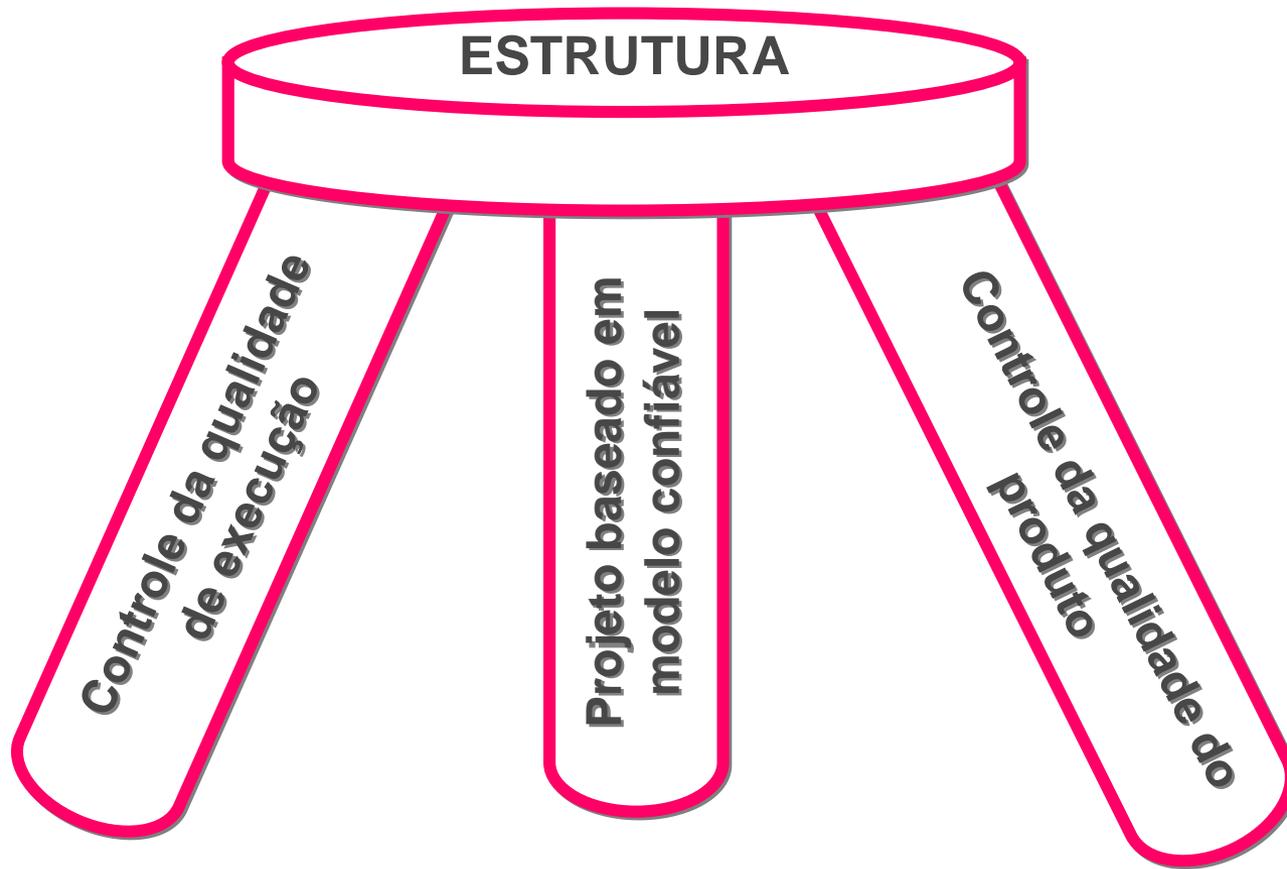
Renata Monte

Luís Bitencourt

# Para utilizar o CRF como material estrutural devemos compreender:

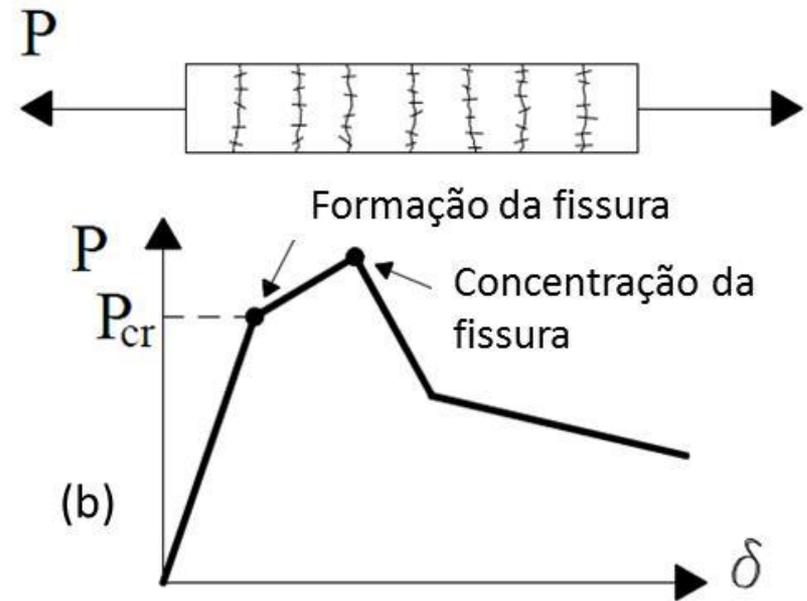
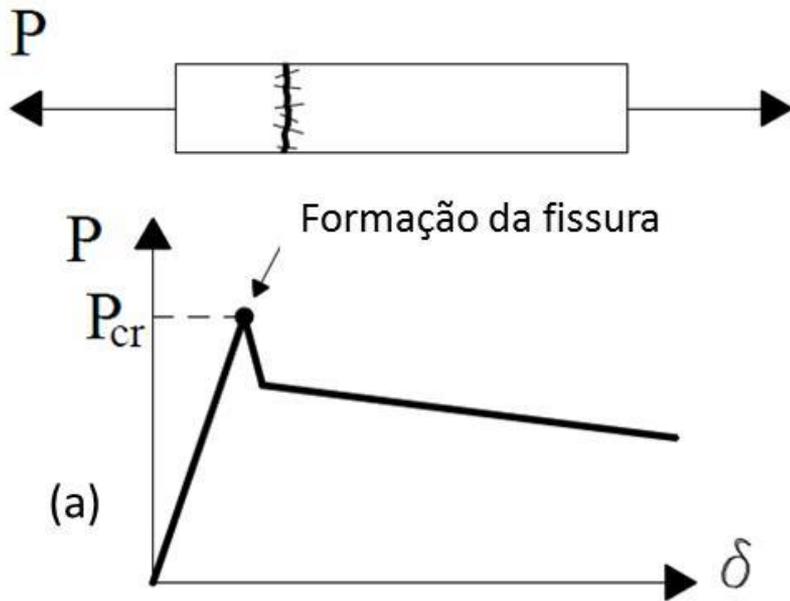
- ✓ Como abordamos um material estrutural (princípios básicos)
- ✓ **Como parametrizamos o seu comportamento: a análise experimental**
- ✓ Como modelamos seu comportamento (modelo de projeto – modelo de previsão de comportamento)
- ✓ **Como garantimos sua qualidade (modelo de controle)**
- ✓ Como executamos a estrutura (modelo de controle de execução da estrutura)

# Modelo básico



# Novo Código Modelo *fib*

- Comportamentos básicos do CRF



# Classificação do comportamento

- Não há definições específicas para trabalhabilidade e durabilidade
  - Há que se desenvolver modelos específicos de controle (o abatimento é adequado?)
  - Há que se parametrizar a durabilidade da estrutura com CRF (parâmetros adotados para o CA são aplicáveis?)
- Para a resistência à compressão não se adota nenhuma alteração de classificação quando baixos teores de fibras são utilizados ( $V_f \leq 1\%$ )

# Classificação do comportamento

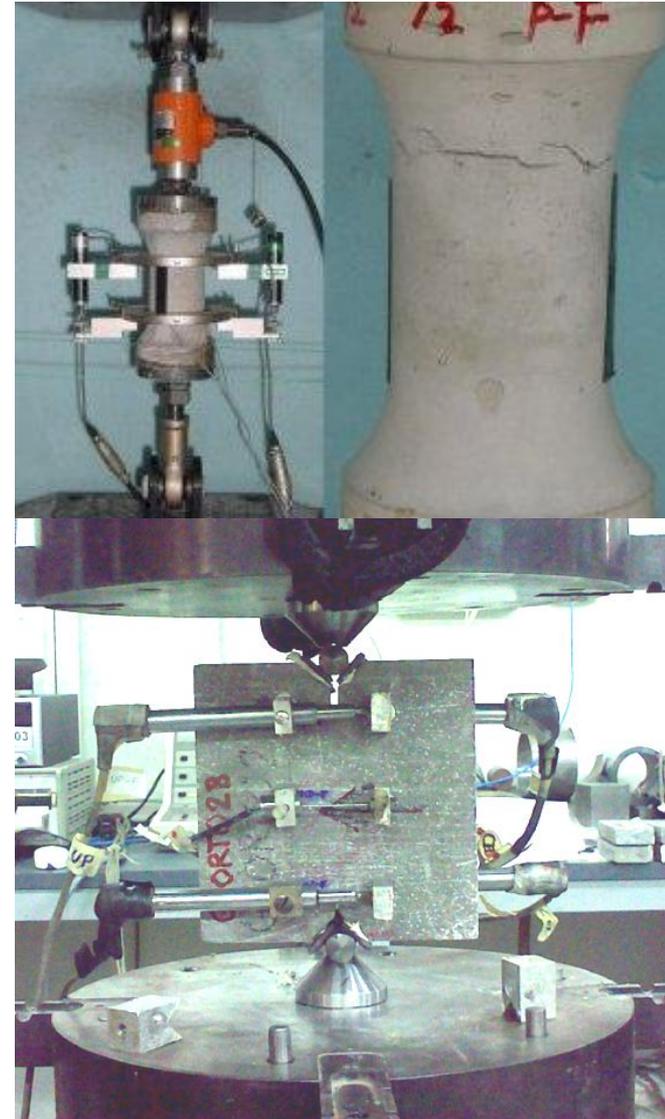
- As principais alterações de classe comportamental vão para o comportamento à tração e **pós-fissuração**
- As classificações são normalmente baseadas nos ensaios de flexão devido às dificuldades associadas ao ensaio de tração direta

# Como avaliar os métodos de ensaio

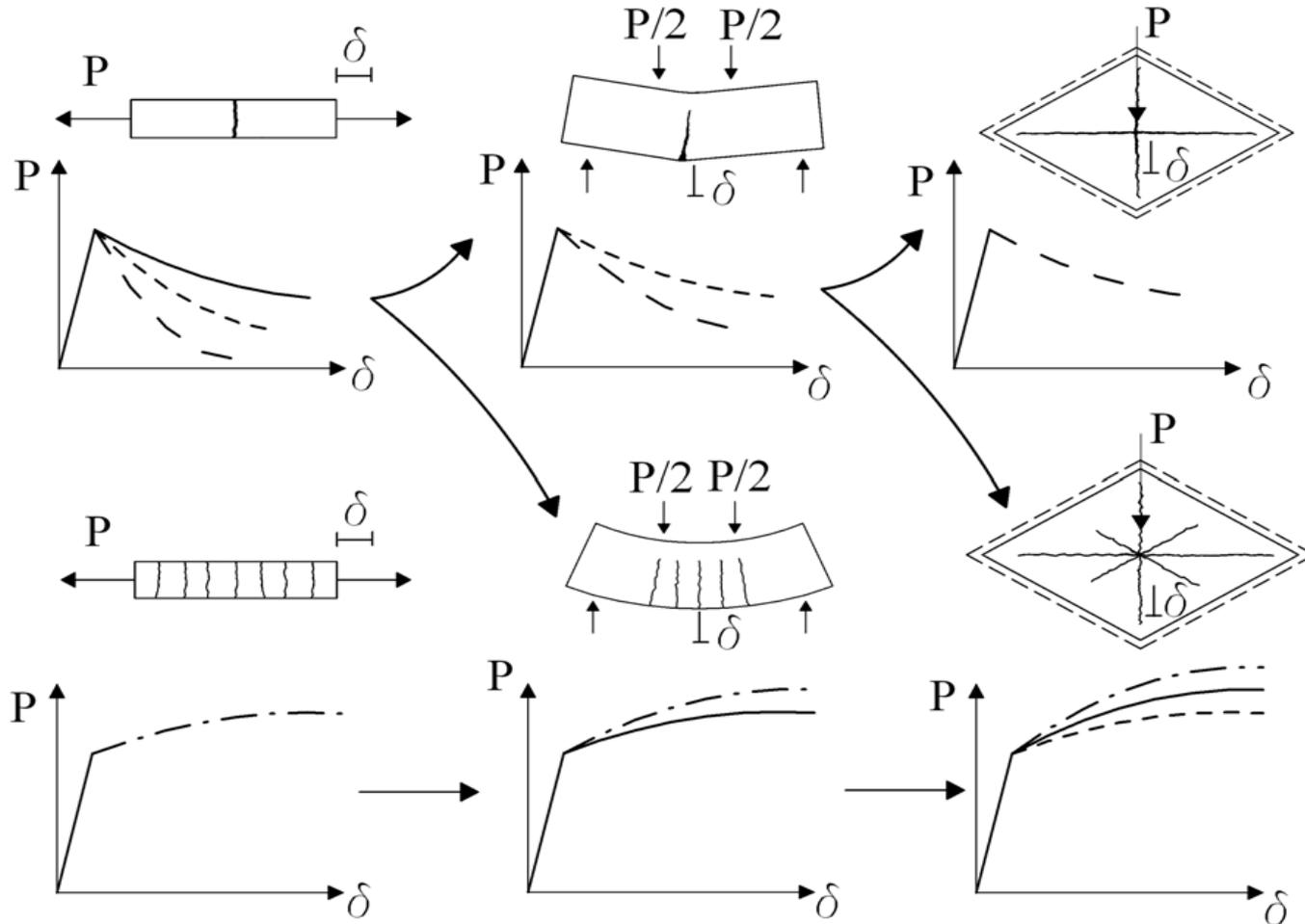
- Principais aspectos que determinam a qualidade de um ensaio de caracterização de CRF:
  - A complexidade do método (dimensões de CP e trabalho para preparação do mesmo, configuração e execução do ensaio).
  - A reprodutibilidade, confiabilidade e dispersão dos resultados.
  - Os custos associados a sua realização.
  - A complexidade para o tratamento dos dados para chegar a uma relação uniaxial do material.
  - A aplicabilidade e nível de aceitação.

# Leis constitutivas para tração uniaxial

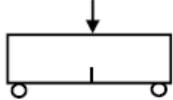
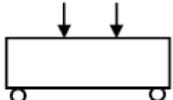
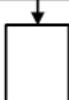
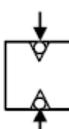
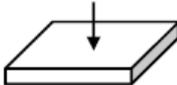
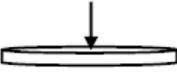
- O ideal é verificar em ensaios de tração direta:
  - *Dog-bone e outros formatos*
  - *Presença ou não de entalhe*
  - Obter a relação  $\sigma$ - $\epsilon$
- Alternativa: DEWS
  - Avalia diretamente na abertura de fissura
- São ensaios **difíceis**



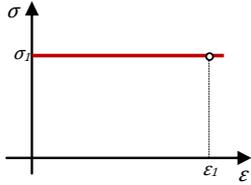
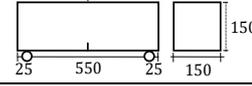
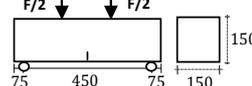
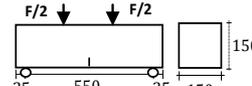
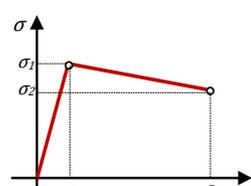
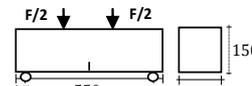
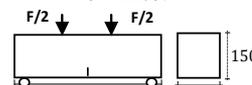
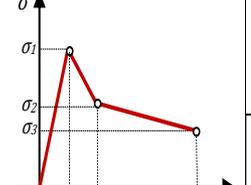
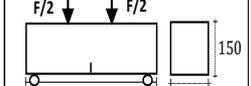
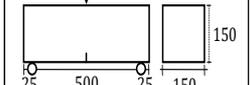
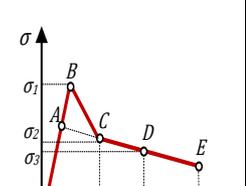
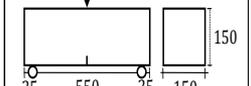
# Diferenças de resposta em função da sollicitação durante o ensaio



# Diferentes métodos de ensaio

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

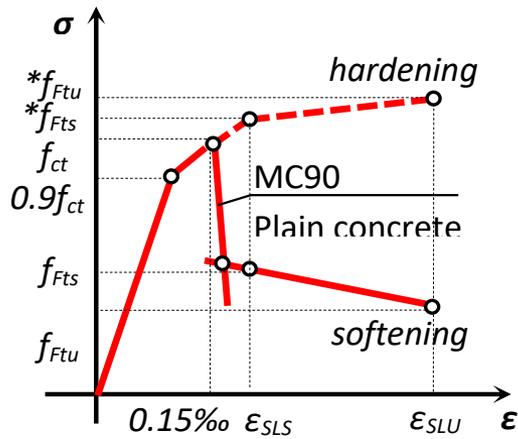
# Equações constitutivas

Diagrama	Parámetros	Ensayo	
	$\sigma_1 = f_{ctR,d} = 0,33 f_{R,3,d}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ flexión; } 10\% \text{ tracción}]$	3-point bending test. UNE EN 14651 	EHE
	$\sigma_1 = f_{Rtu} = f_{eq2}/3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ reblandecimiento ; } 10\% \text{ endurecimiento}]$	4-point bending test UNI 11039 	CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,t} \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = 10\%$	4-point bending test NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctk,t} \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,t} \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = 10\%$	4-point bending test NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = f_{Rts} = 0,45 f_{eq1}$ $\sigma_2 = f_{Rtu} = k [f_{Rts} - (w_u/w_2)(f_{Rts} - 0,5 f_{eq2} + 0,2 f_{eq1})]$ $k = [0,7 \text{ tracción pura, } 1 \text{ resto de casos}]$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = [20\% \text{ reblandecimiento ; } 10\% \text{ endurecimiento}]$	4-point bending test. UNI 11039 	CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f_{ctd} = \alpha_c^f f_{ctk,t} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctk,t} \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_3 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,t} \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}$ $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0,1\%$ $\epsilon_3 = \epsilon_u = 10\%$	4-point bending test NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = 0,7 f_{ctm,d} (1,6-d)$ $\sigma_2 = 0,45 \cdot K_{tr} \cdot f_{R,1}$ $\sigma_3 = 0,37 \cdot K_{tr} \cdot f_{R,4}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}$ $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0,1\%$ $\epsilon_3 = \epsilon_u = 25\%$	3-point bending test RILEM TEST 	RILEM
	$\sigma_1 = f_{ctd} = 0,6 f_{ctR,d}$ $\sigma_2 = f_{ctR1,d} = 0,45 f_{R,1,d}$ $\sigma_3 = f_{ctR3,d} = k_1 (0,5 f_{R,3,d} - 0,2 f_{R,1,d})$ $\epsilon_2 = 0,1 + 1000 \cdot f_{ctd} / E_{c,0}$ $\epsilon_3 = 2,5 / I_{cs}$ (les: long.critica) $\epsilon_u = [20\% \text{ flexión; } 10\% \text{ tracción}]$	3-point bending test. UNE EN 14651 	EHE

Norma Alemã DBV 1992 (2001), Italiana CNR-DT 204 (2006), Espanhola EHE-08 (2008)

Fonte: Blanco et al. (2013)

# fib Model Code 2010 – Equação constitutiva



$$f_{ctm} = 0.30(f_{ck})^{2/3}$$

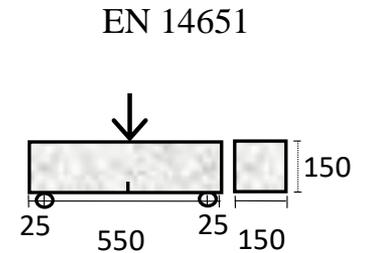
$$f_{Fts} = 0.45f_{R1}$$

$$f_{Ftu} = k[f_{Fts} - (w_u / CMOD_3)(f_{Fts} - 0.5f_{R3} + 0.2f_{R1})]$$

$$\epsilon_{SLS} = CMOD_1 / l_{cs}$$

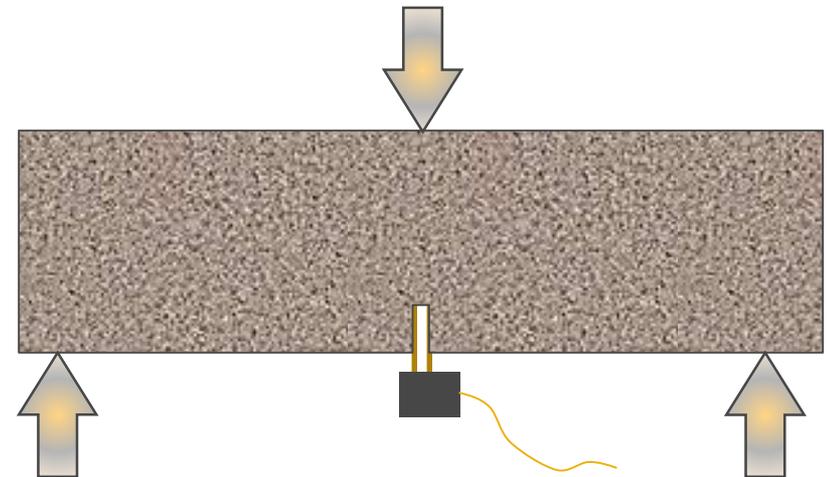
$$\epsilon_{SLU} = w_u / l_{cs} = \min(\epsilon_{Fu}, 2.5 / l_{cs} = 2.5 / y)$$

$$\epsilon_{Fu} = [20\text{‰ softening}; 10\text{‰ hardening}]$$



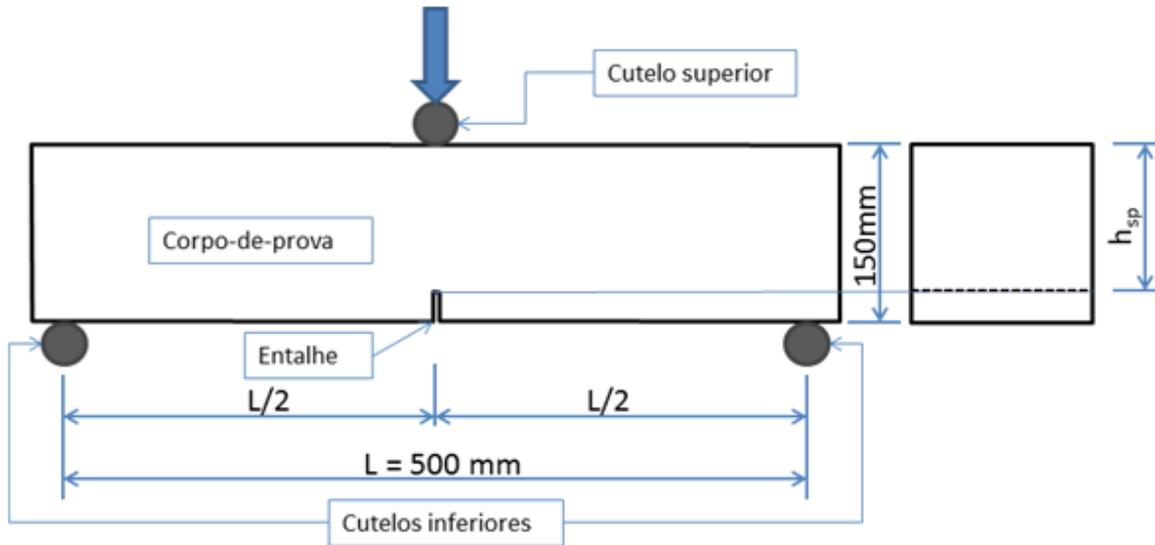
# Controle básico da resistência residual

- EN 14651 (2007): ensaio de tração na flexão em três pontos realizado em viga com entalhe e controle de deformação através de CMOD ou  $\delta$ .

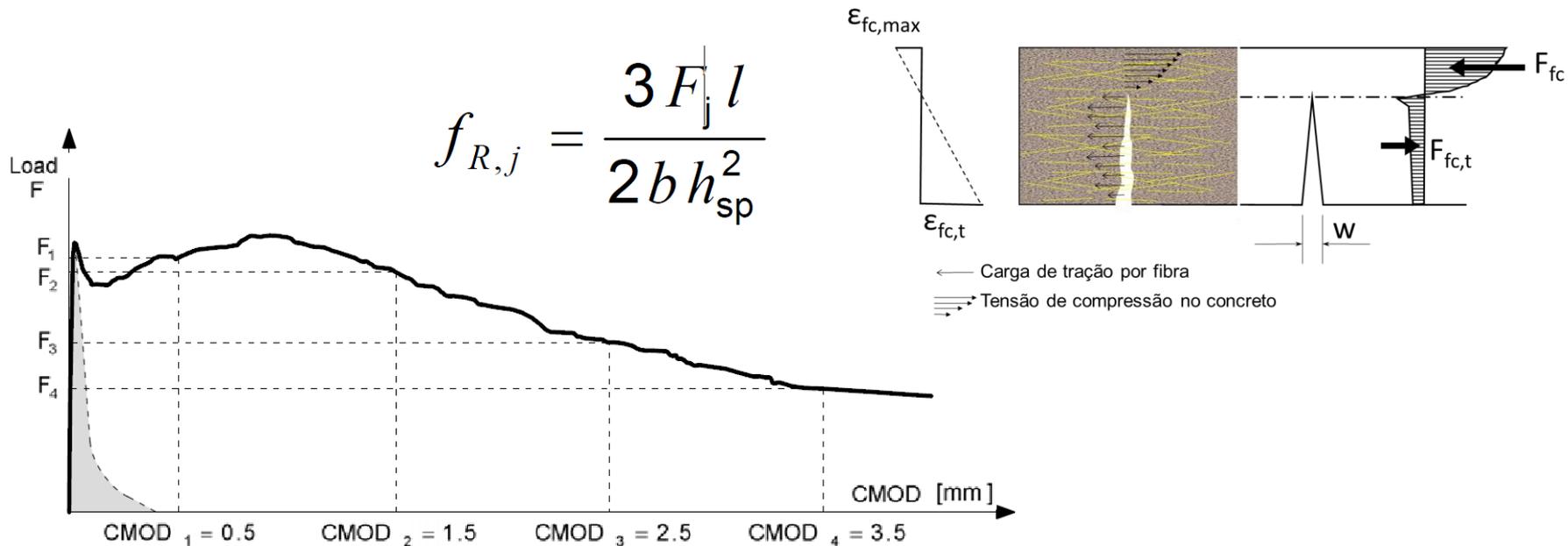


*fib Model Code*

# Comportamento pós-fissuração do CRF



- Flexão em prismas EN14651



# Novo Código Modelo *fib* - *classificação*

- 2 Parâmetros:  $f_{R1k}$  e a relação  $f_{R3k}/f_{R1k}$

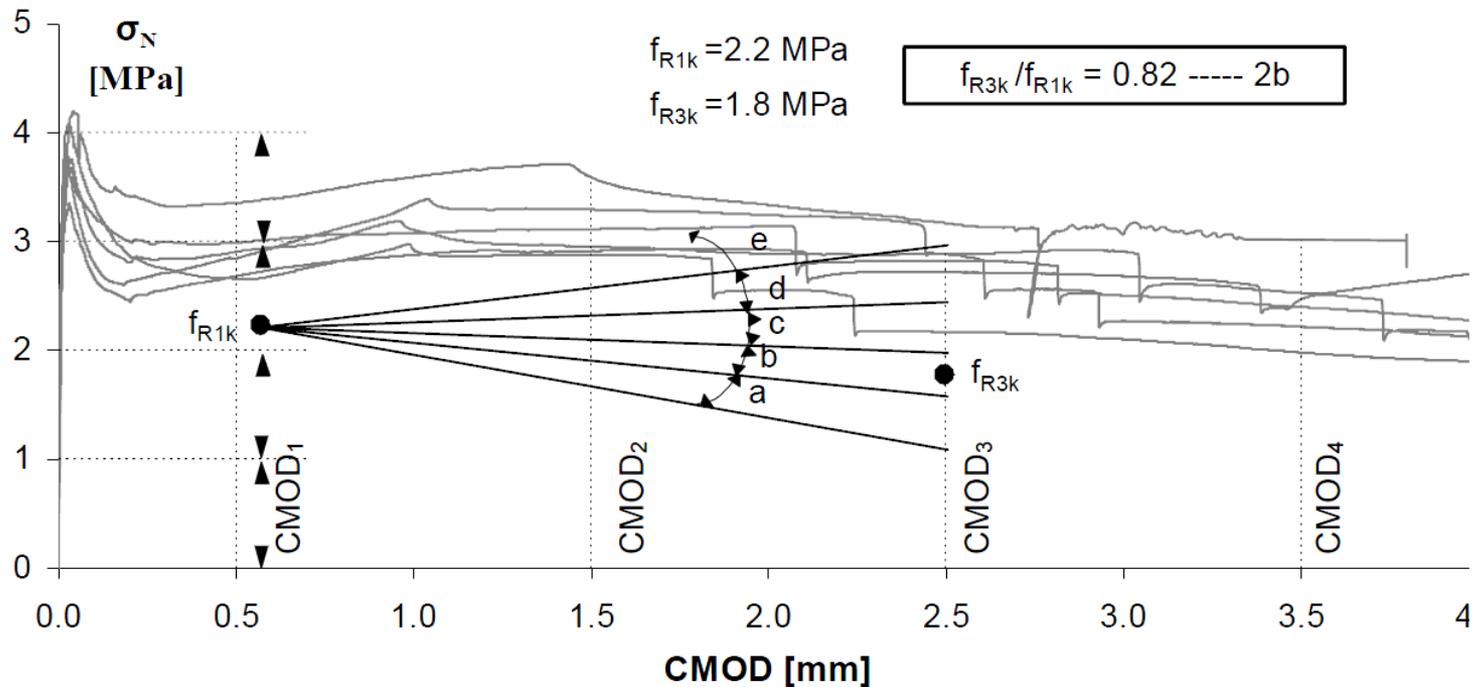
“a” se  $0.5 \leq f_{R3k}/f_{R1k} \leq 0.7$

“b” se  $0.7 \leq f_{R3k}/f_{R1k} \leq 0.9$

“c” se  $0.9 \leq f_{R3k}/f_{R1k} \leq 1.1$

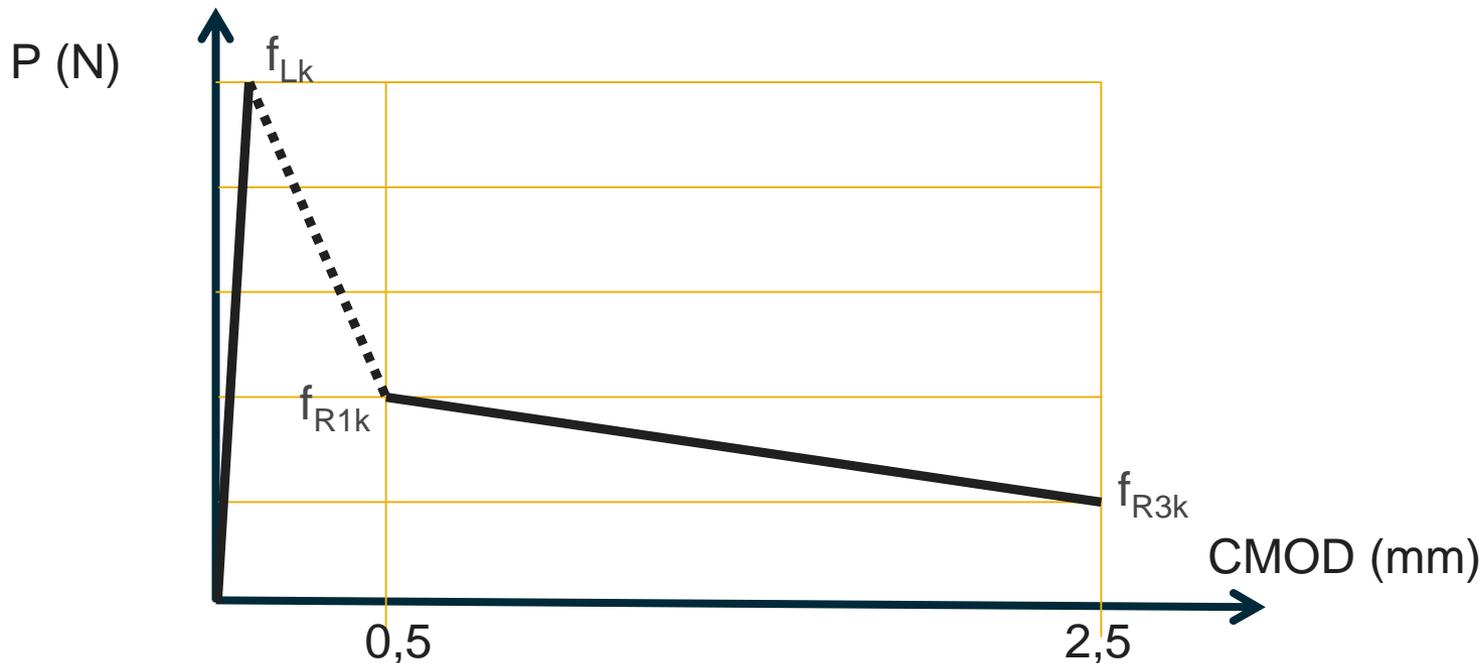
“d” se  $1.1 \leq f_{R3k}/f_{R1k} \leq 1.3$

“e” se  $1.3 \leq f_{R3k}/f_{R1k}$



# Condições básicas

- Para o CRF ser considerado como material de reforço as seguintes *mínimas* relações devem ser atendidas:
  - $f_{R1k}/f_{Lk} \geq 0,4$
  - $f_{R3k}/f_{R1k} \geq 0,5$

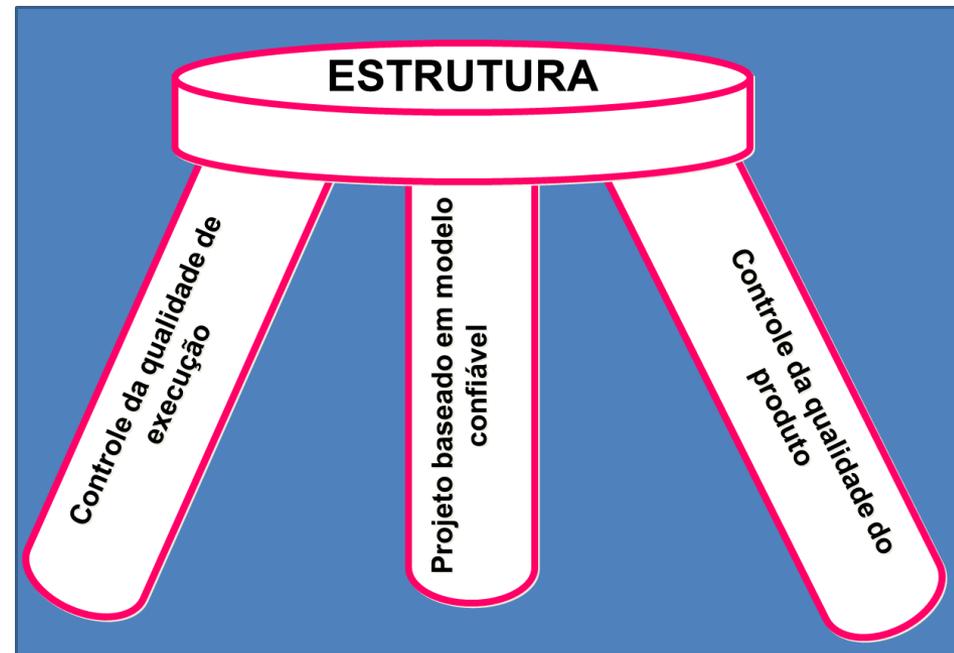


# Primeiro problema

- O próprio *fib* Model Code afirma que não é aplicável para pavimentos e concreto projetado
- Não afirma explicitamente, mas também não se aplica a tubos
- Porém, o enfoque do *fib* Model Code pode ser aplicado a várias concepções

# Segundo problema: como controlar?

- O ensaio EN14651 é executado em pouquíssimos laboratórios
  - O próprio *fib* Model Code admite o uso de ensaios “alternativos”
- No Brasil nós mal controlamos a resistência à compressão (CARROMEU et al., 2012 e BAUER, 2017; MAGALHÃES et al., 2013).



# O controle do CRF

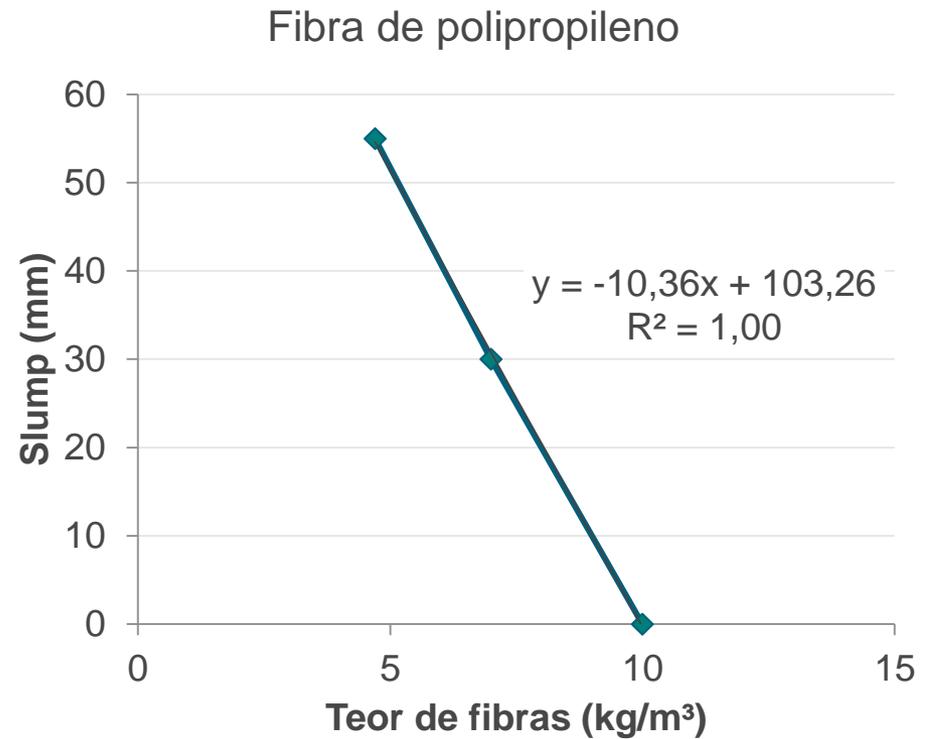
- Controle das matérias-primas (fibras)
  - ✓ Norma brasileira apenas para fibras de aço
  - ✓ Práticas recomendadas para macrofibras poliméricas e de vidro
- Controle do material CRF
  - ✓ Mistura
  - ✓ Trabalhabilidade
  - ✓ Comportamento mecânico
- Controle de aplicação/execução

# Mistura

- Como introduzir as fibras?
- Homogeneização – liberação das fibras em pentes ou feixes
  - Mistura prévia com agregados ou com o concreto pronto
- Tempo de mistura adequado
- Dosador automático
- Colocação na esteira (fibras sintéticas?)

# Trabalhabilidade

- Pode usar slump?



Borges, 2014 (Relatório FAPESP – IC)

# E o controle tecnológico do CRF se a moldagem não segue os mesmos parâmetros?

- Trabalhabilidade e lançamento:

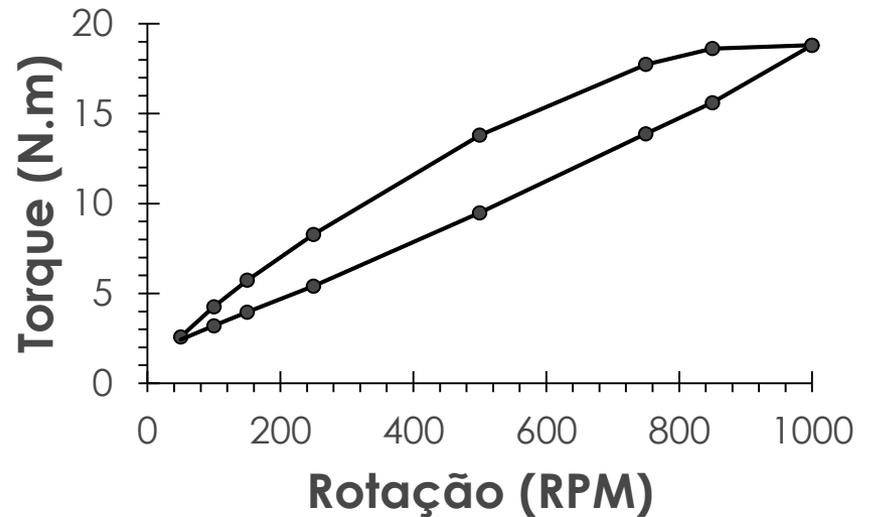
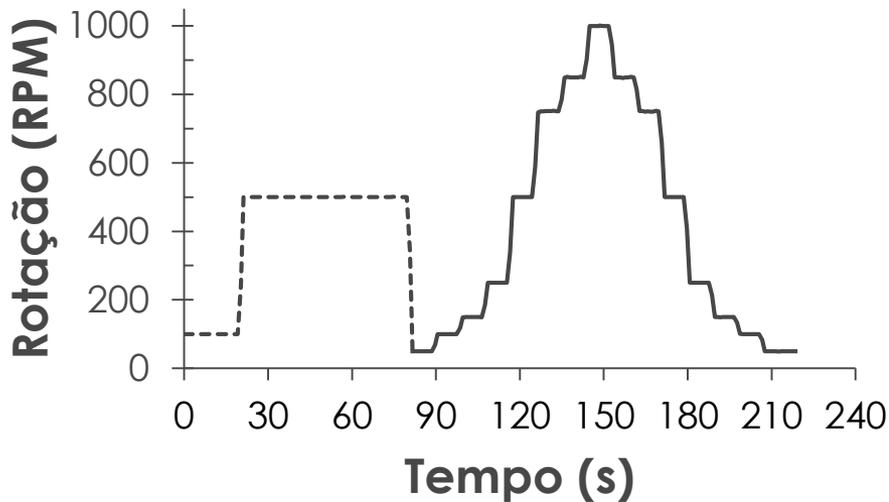


ALFERES FILHO, R. S.; MOTEZUKI, F. K.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G.; FIGUEIREDO, A. D. Evaluating the applicability of rheometry in steel fiber reinforced self compacting concretes. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. Aceito para publicação em 2017.

ALFERES FILHOS, R. S. Avaliação da influência do direcionamento de fibras de aço no comportamento mecânico de concreto autoadensável aplicado em elementos planos. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP. 2016

# Reometria rotacional

- Aproximadamente 18L de concreto
- Ciclo de cisalhamento
- Etapa de re-homogeneização
- Variação de velocidade 50 – 1000 – 50 RPM
- Patamares de velocidade (9s)
- Obtenção do Torque (N.m)



# Resultados

## Caixa L e espalhamento:

Teor de fibra (kg/m <sup>3</sup> )	0	20	80	120
Caixa – L (h2/h1)	1,0	1,0	0,74	0
Espalhamento (mm)	785	795	775	780

Limites (EFNARC)	
mín.	máx.
0,8	1,0
650	800

Bloqueio



Segregação

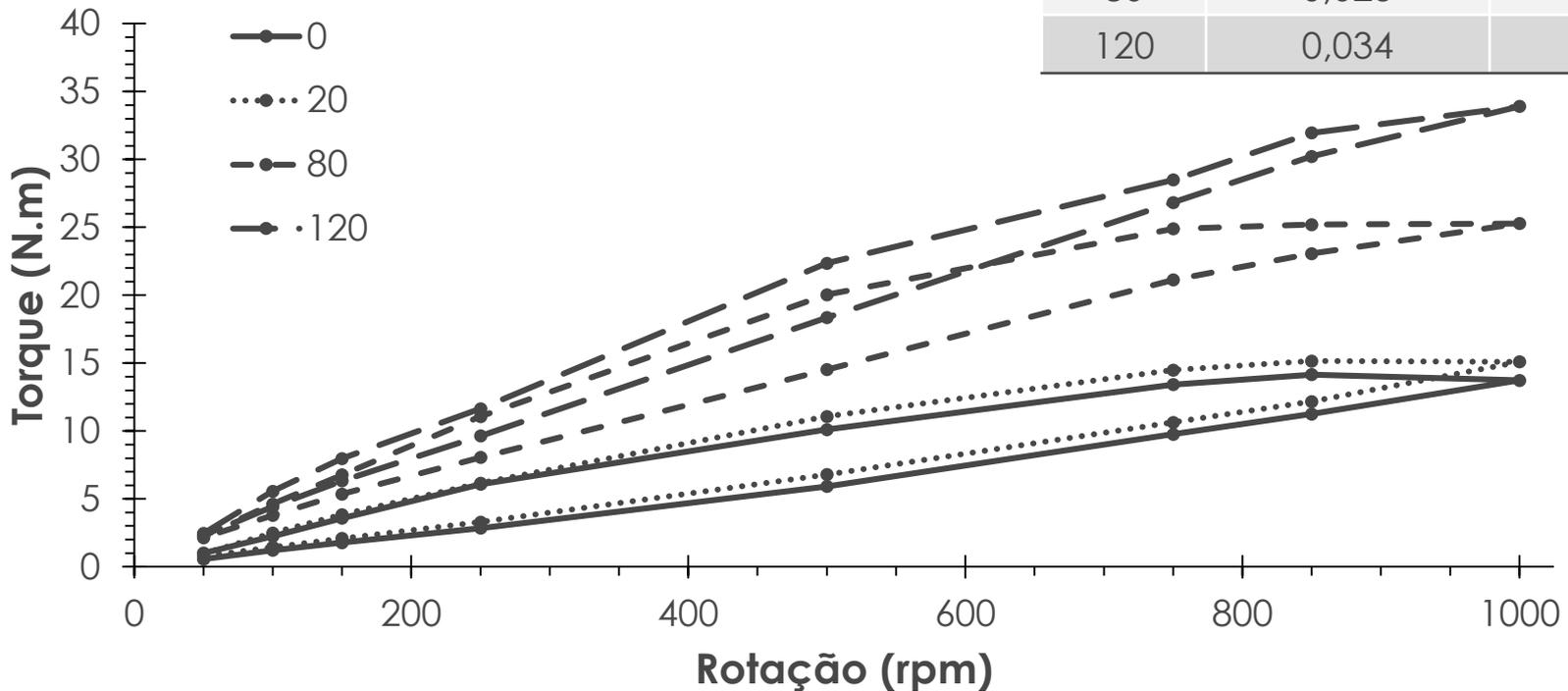


# Resultados

## Reometria rotacional:

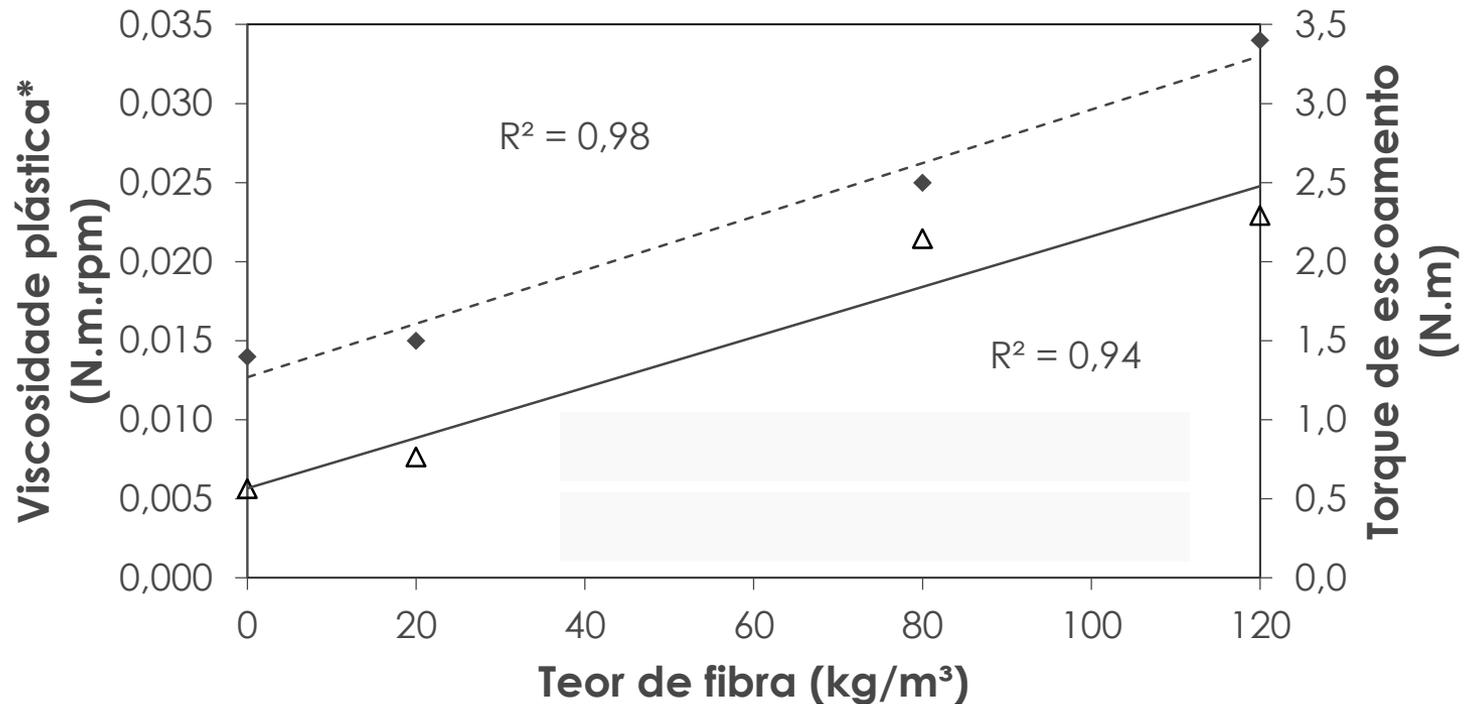
- Comportamento reológico pseudoplástico
- 20 kg/m<sup>3</sup> de fibra: Impacto pouco significativo

Teor de fibra	“Viscosidade plástica”	Torque de escoamento (N.m)
0	0,014	0,56
20	0,015	0,77
80	0,025	2,15
120	0,034	2,29



# Resultados

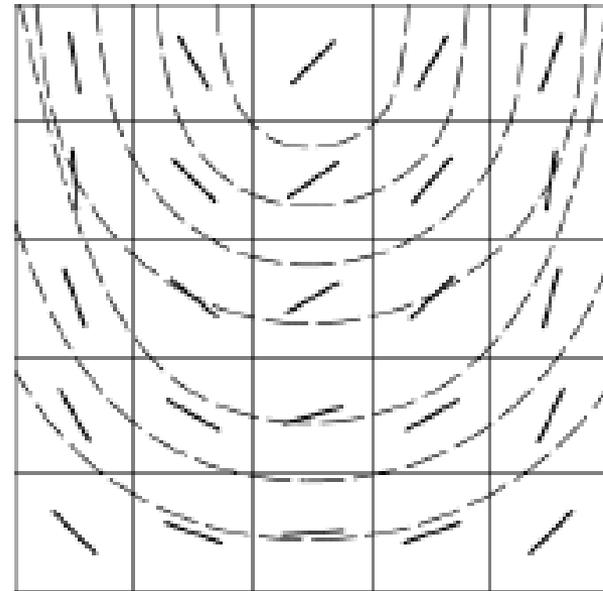
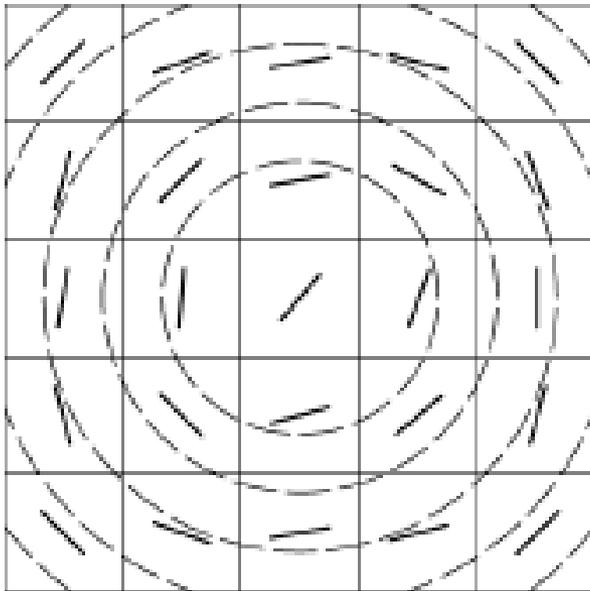
## Relação: Teor de Fibra x Parâmetros reológicos



**Utilização conjunta dos métodos: Maior capacidade de análise**

# Aplicação

- Reforço híbrido – cuidados para as fibras não ficarem retidas na armadura (limitar comprimento da fibra)
- Auto adensável – cuidados com a orientação das fibras com o fluxo e a segregação



ALFERES FILHO, 2016

# Estudo em lajes

- PUJADAS, P. **Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas.** UPC, 2013.

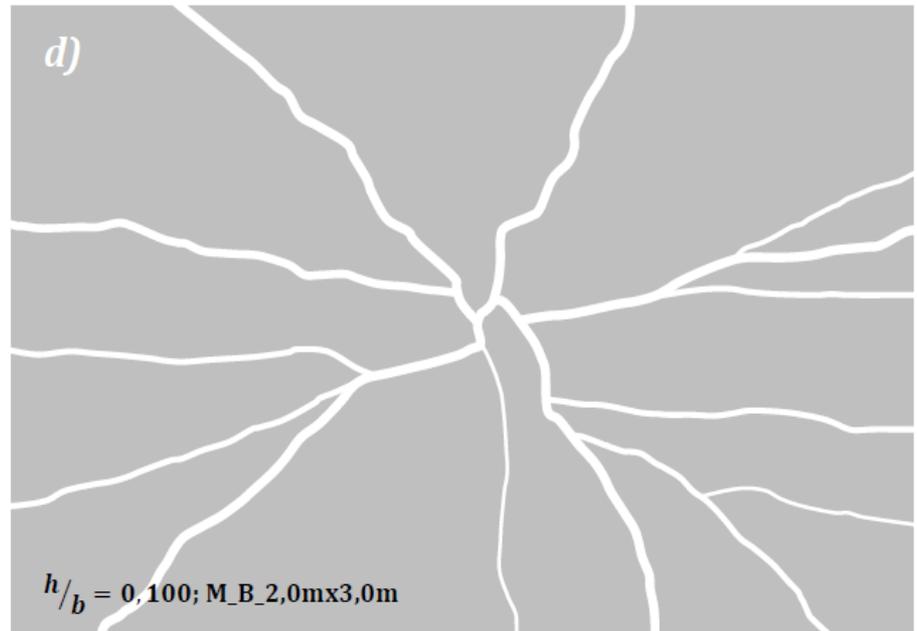


# Avaliação em elementos de grande escala

- Moldagem com SCPFRC a partir do centro.
- Ensaio de punção central.



# Padrão de ruptura



# Resultados (cargas e deflexões máximas)

- Superestimação dos valores obtidos com os modelos RILEM e EHE utilizando os resultados obtidos em prismas.
- O grau de orientação da fibra também existe, mas não é tão favorável quanto ocorre no prisma.

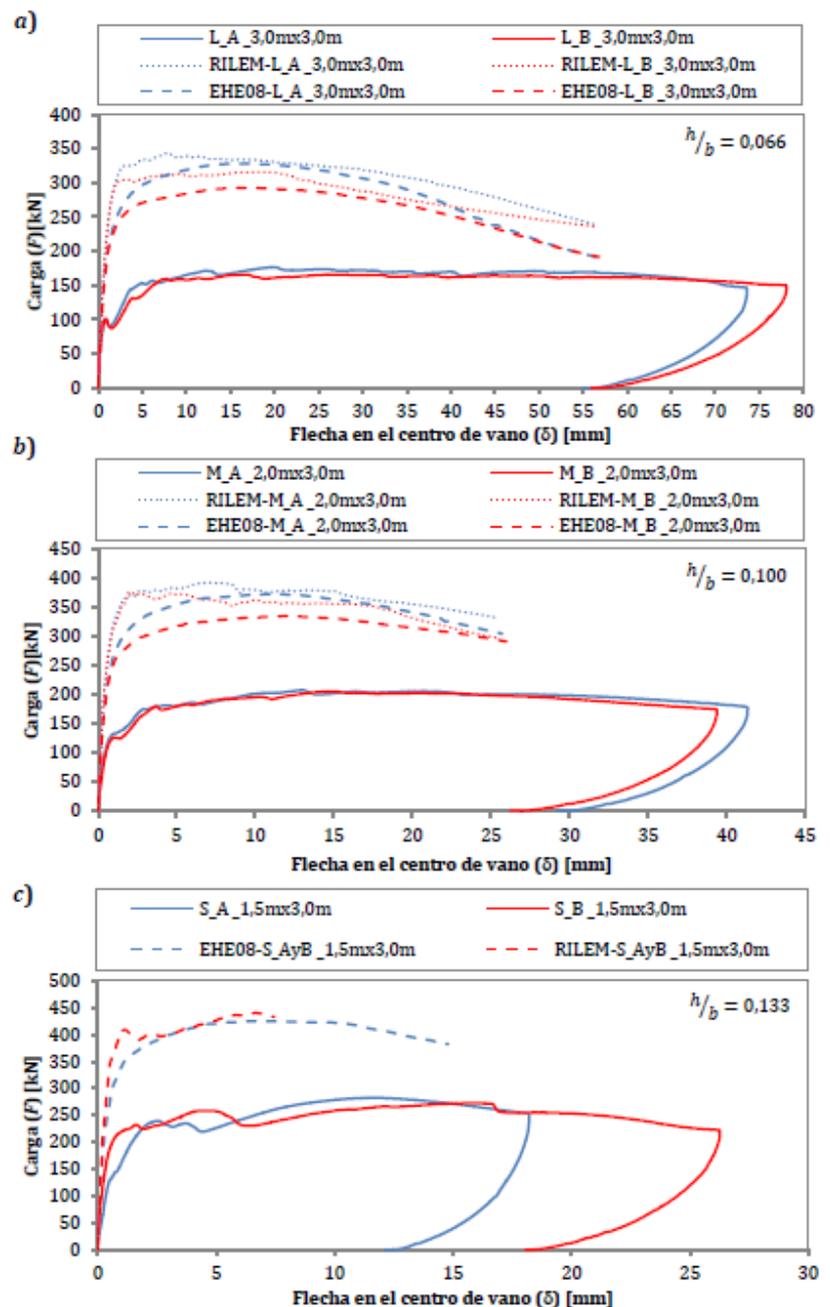


Figura 4.27 - Comparación resultados numéricos y experimentales para las losas

a) L\_A y B\_3,0mx3,0m b) M\_A y B\_2,0mx3,0m y c) S\_A y B\_1,5mx3,0m

# Fatores relacionados à fibra que influenciam a resposta do CRF

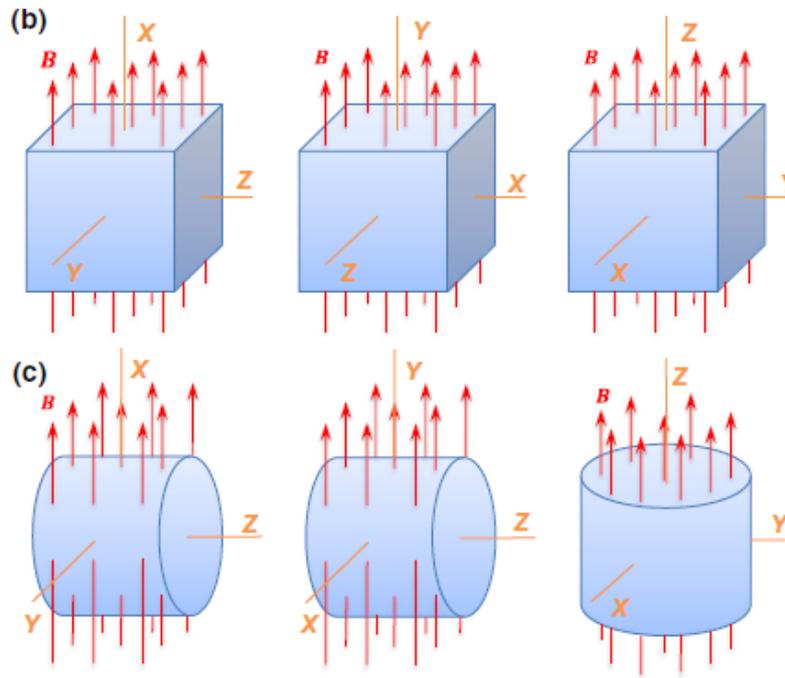
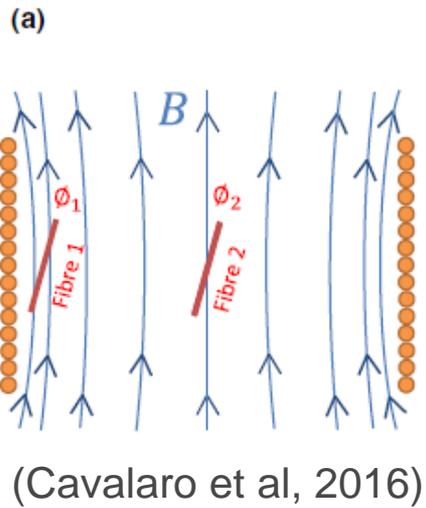
- resistência mecânica;
- distribuição;
- volume;
- comprimento;
- número de fibras;
- etc.

# Controle do teor incorporado de fibras

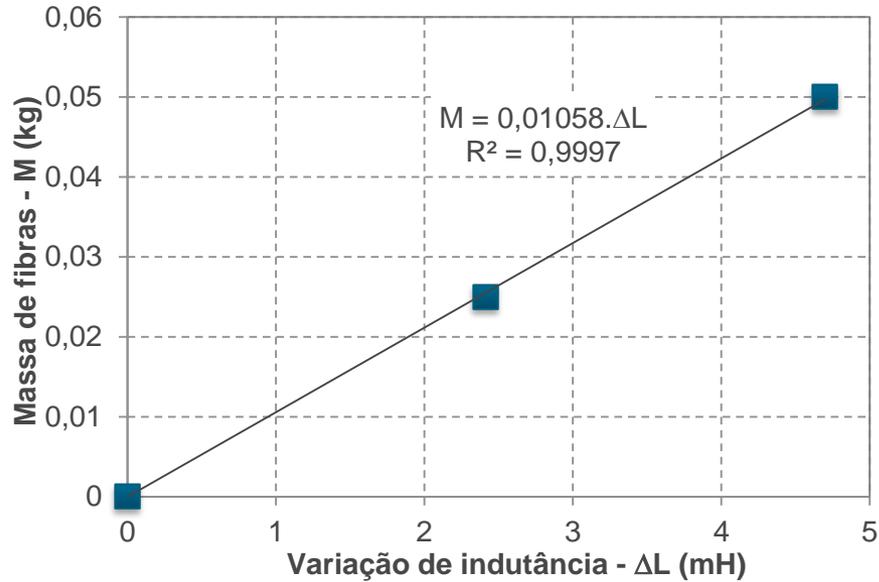
- Estado fresco
  - volume conhecido, lavagem pasta, separação das fibras para secagem e determinação da massa de fibras
- Estado endurecido – após ruptura
  - volume conhecido, esmagamento, separação das fibras e determinação da massa de fibras
- Ensaio indutivo
  - método indireto – apenas fibra de aço

# Indutivo

- ✓ Desenvolvido e aprimorado na UPC
- ✓ Avaliar quantidade e orientação de fibras



# Calibração



Shape	Size (mm)	Parameter		
		$B_{V,x}$	$B_{V,y}$	$B_{V,z}$
Cylindrical	$\phi 100 \times 100$	536	536	538
	$\phi 150 \times 150$	1,789	1,789	1,809
Cubic	$100 \times 100 \times 100$	695	695	695
	$150 \times 150 \times 150$	2,342	2,342	2,342

$$Cf = \beta \sum_{i=x,y,z} \frac{\Delta L_i}{B_{v,i}}$$

(Cavalaro et al, 2016)

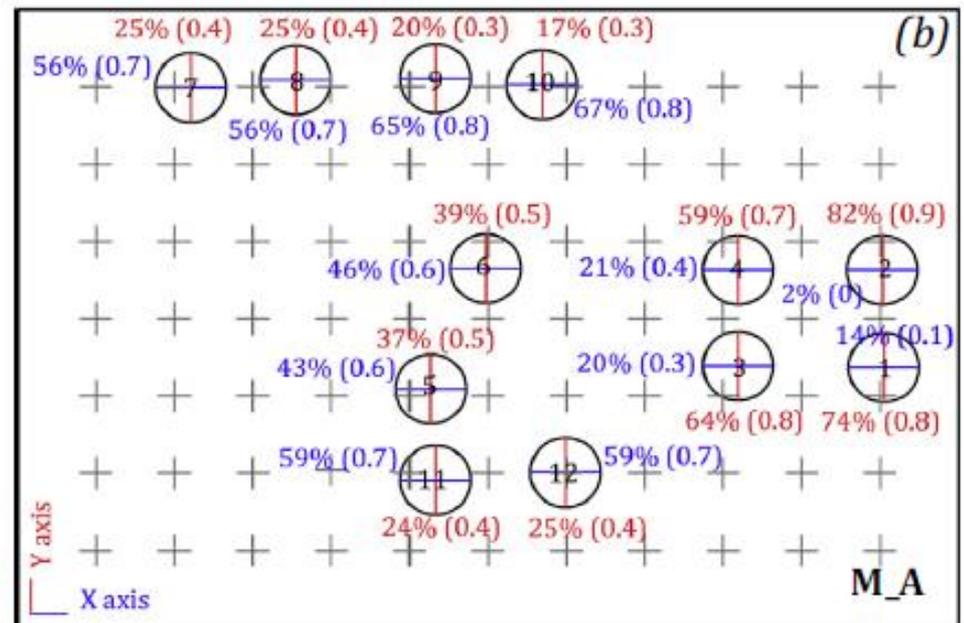
# Indutivo - aplicações

Segmentos de túneis



Galobardes et al., (2015)

Laje plana



Blanco et al., (2015)

Não há norma brasileira de  
ensaios de caracterização  
do CRF

# Práticas recém publicadas

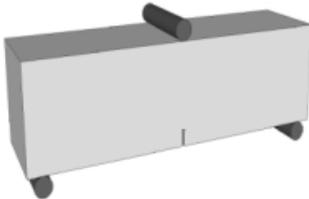
- 1. Macrofibras poliméricas para concreto destinado a aplicações estruturais:** definições, especificações e conformidade
- 2. Macrofibras de vidro álcali resistentes (AR) para concreto destinado a aplicações estruturais:** definições, especificações e conformidade
- 3. Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras** (métodos de ensaio)

**Ainda** não há norma brasileira  
de ensaios de caracterização  
do CRF

## Três comissões de estudo trabalhando no tema CRF

- Comissão de Estudo de Concreto Reforçado com Fibras (CE 018:300.011)
- Proposição de três normas
  - Requisitos e critérios de controle tecnológico
  - Método de **ensaio de tração na flexão 3 pontos c/ entalhe**
  - Método de ensaio de duplo puncionamento

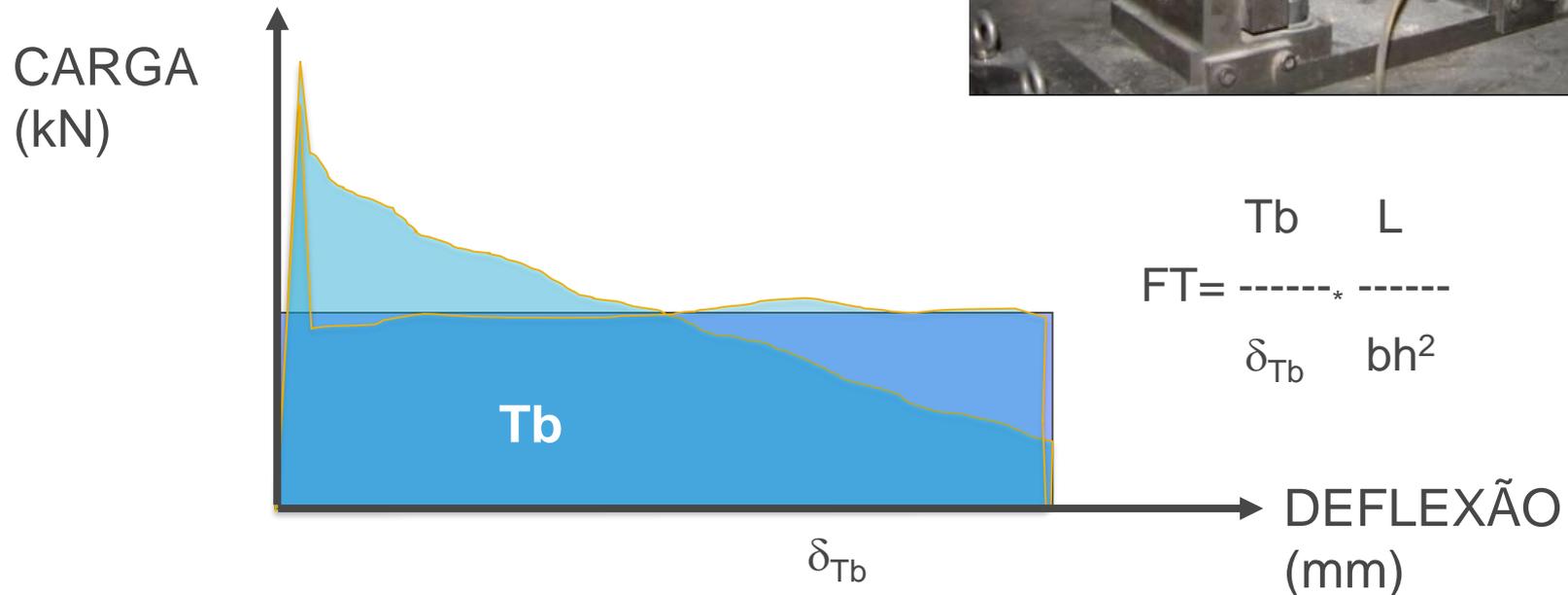
# ENSAIOS DE FLEXÃO

Item	ASTM C1609	JSCE-SF4	EN 14651
Representação esquemática			
Tipo de controle	closed-loop	open-loop (1984)	closed-loop
Variável controlada	deslocamento vertical	deslocamento vertical	deslocamento vertical abertura de fissura
Geometria (mm <sup>3</sup> )	100 x 100 x 350 ou 150 x 150 x 500	100 x 100 x 350 ou 150 x 150 x 500	150 x 150 x 550
Vão (mm)	300 ou 450	300 ou 450	500
Velocidade (mm/min)	0 a L/600: 0,06 a 0,12 L/600 a L/150: 0,06 a 0,24	0,15 a 0,50	0 a 0,10mm: 0,05 0,10 a 4,0mm: 0,2
Número de LVDTs	2	1 ou 2	2
Análise do gráfico	Cargas residuais ( $P_{d,L/600}$ e $P_{d,L/150}$ )	Área sob a curva	Carga máxima 0,05mm ( $F_L$ ) cargas residuais ( $F_j$ )
Resultados obtidos	Resistências residuais ( $f_{d,L/600}$ e $f_{d,L/150}$ ), Tenacidade ( $T_{d,L/150}$ )	Tenacidade ( $T_b$ ) e fator de tenacidade à flexão (FT)	Limite de proporção ( $f_{ct,L}$ ) e resistências residuais ( $f_{R,j}$ )

Fonte: Salvador (2013)

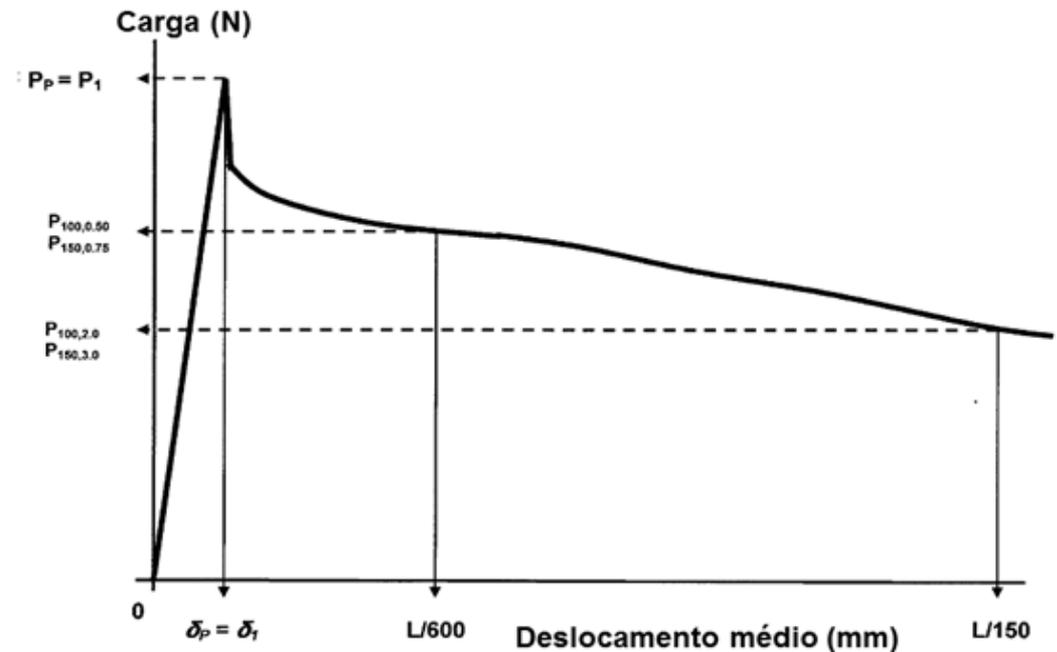
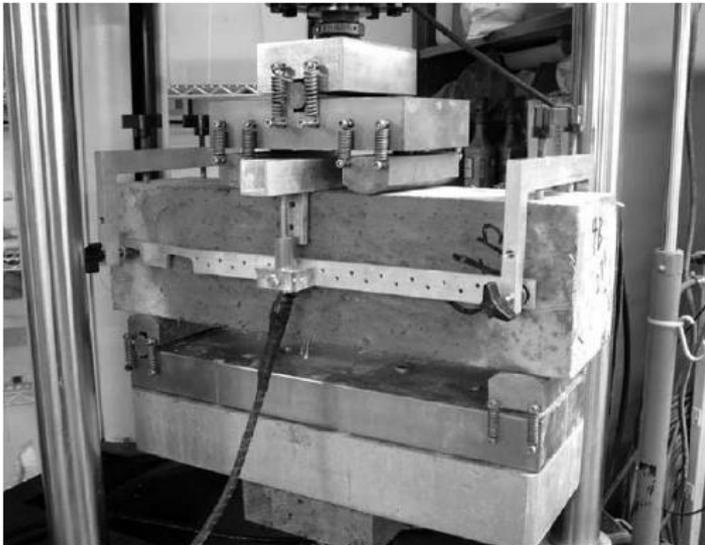
# Controle tradicional do CRF JSCE-SF4 (1984)

- Controle por absorção de energia até 2 ou 3 mm de deslocamento.
- Método totalmente antiquado e ultrapassado

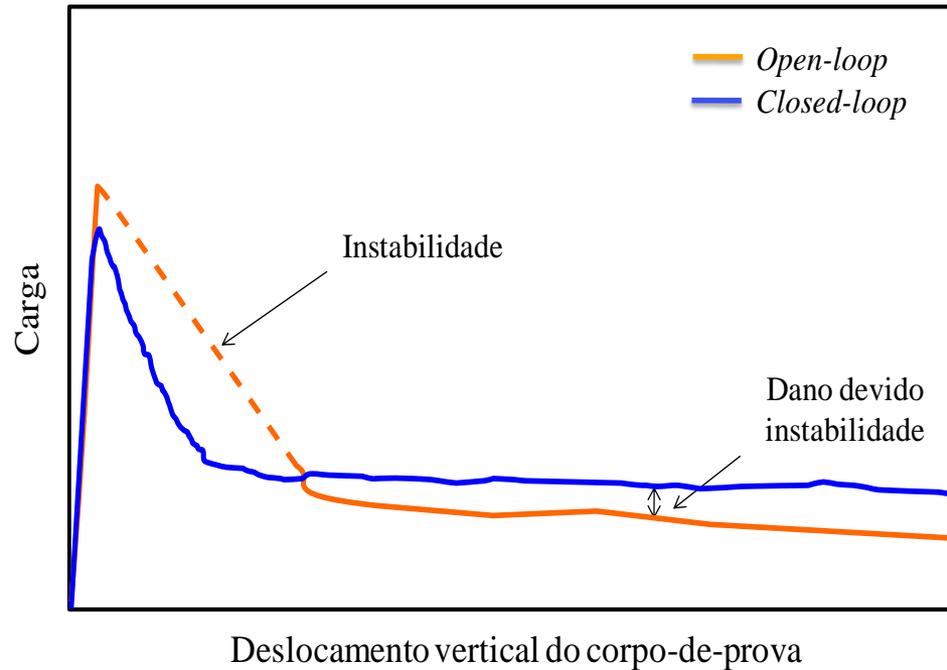


# Caracterização do comportamento pós-fissuração do CRF

- Flexão em prismas ASTM C1609 (já está realizado com simplificações: sem closed-loop = JSCE SF4)



# Instabilidade dos ensaios Open-loop



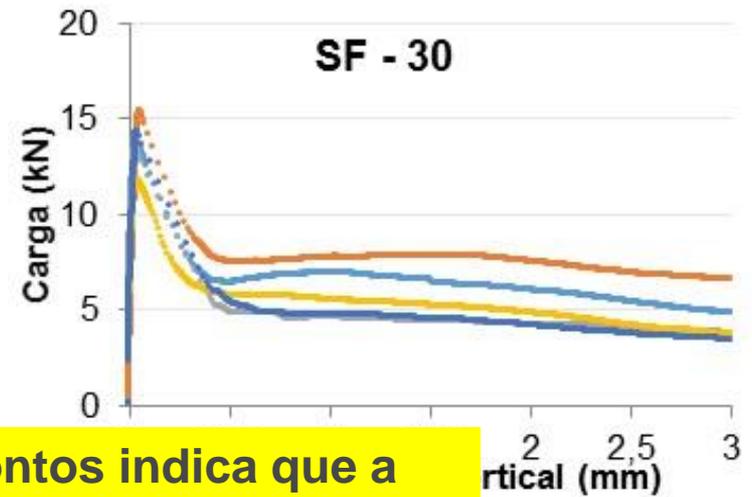
(BANTHIA; DUBEY, 1999).

- No sistema closed-loop o **deslocamento vertical** ou a **abertura da fissura é mantido constante** durante todo o ensaio.
- A variável funciona como **retorno para a aplicação de carga proporcional à deformação do corpo de prova.**

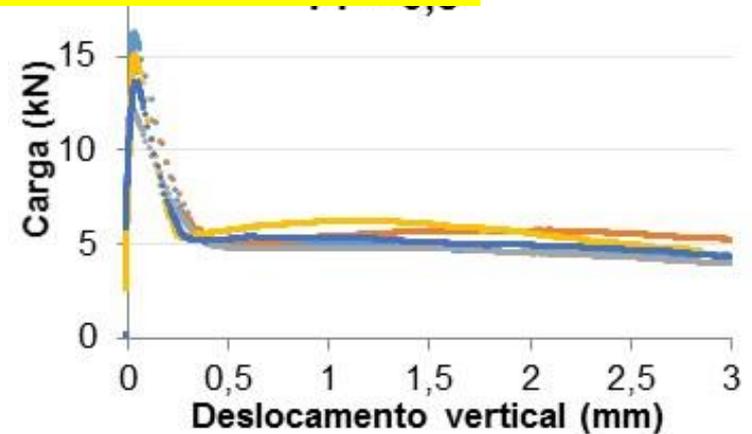
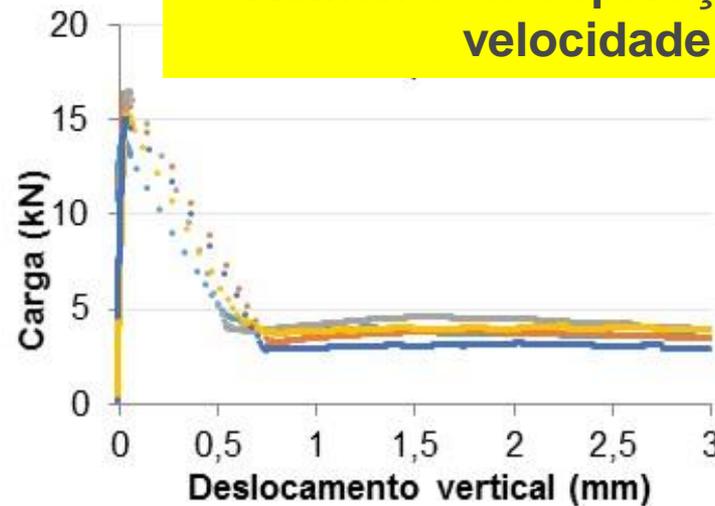
# Instabilidade no ensaio - causas

- Alta resistência da matriz em comparação à resistência mecânica da fibra;
- Baixo volume de fibras empregado;
- Quantidade insuficiente de fibras na seção de ruptura;
- Falta de rigidez do equipamento;
- Sistema de controle da velocidade;
- Método de ensaio (redundância).

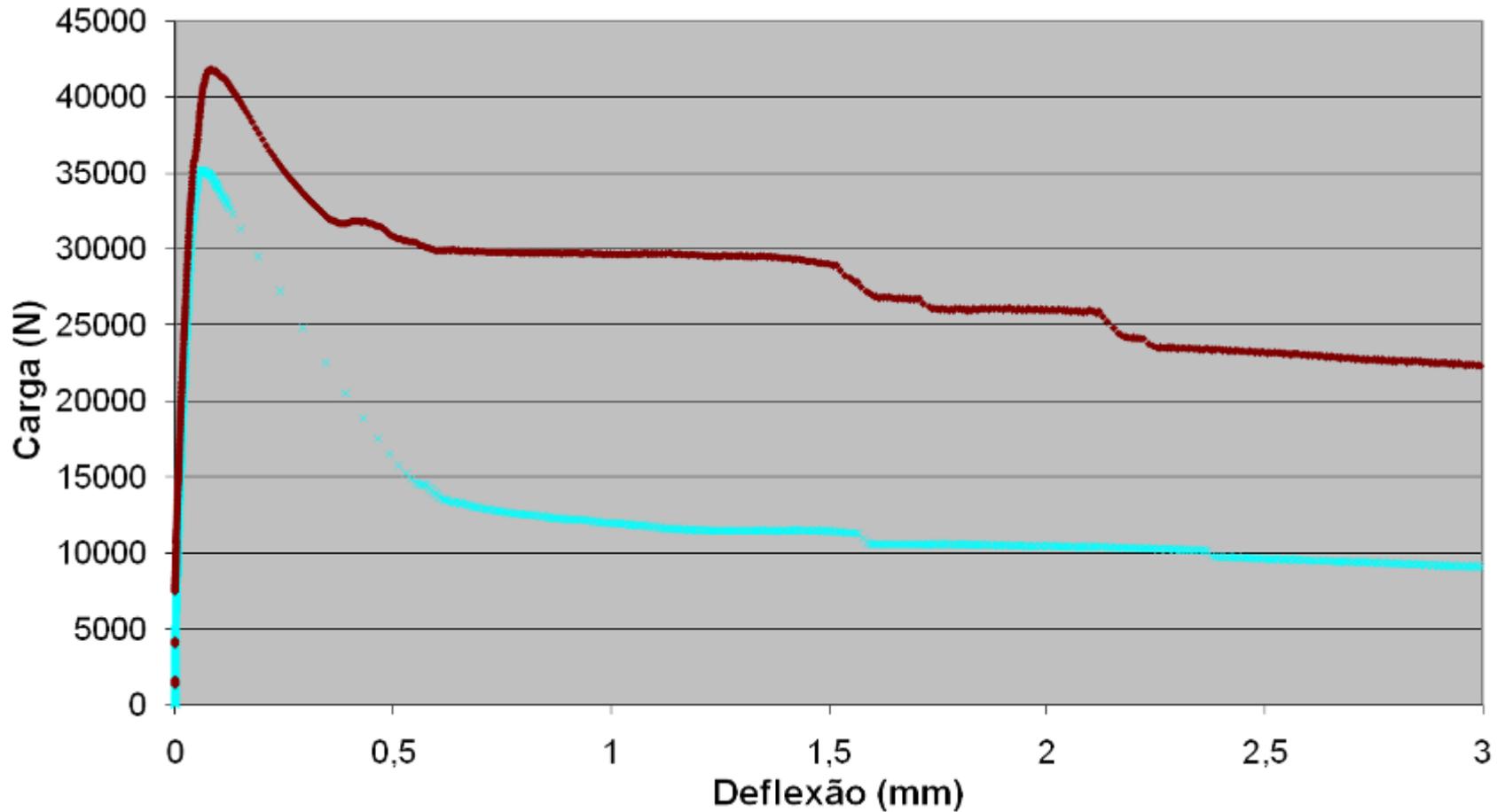
# Efeito da Instabilidade – Exemplos



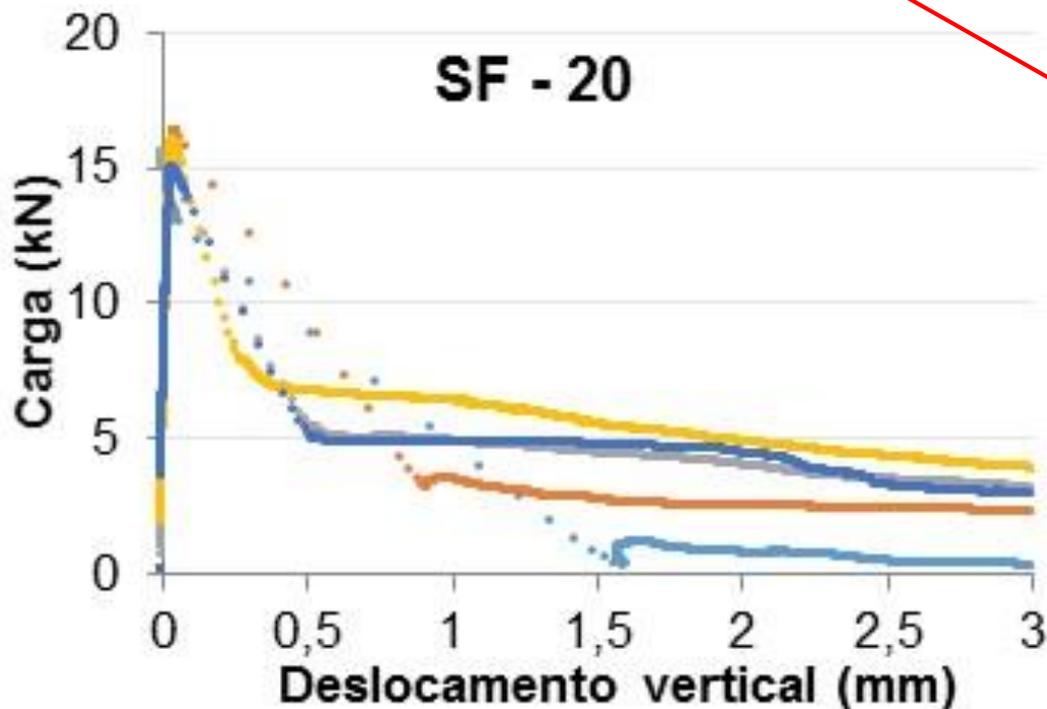
**Aumento da separação dos pontos indica que a velocidade não foi constante**



# Exemplo de instabilidade pós-pico



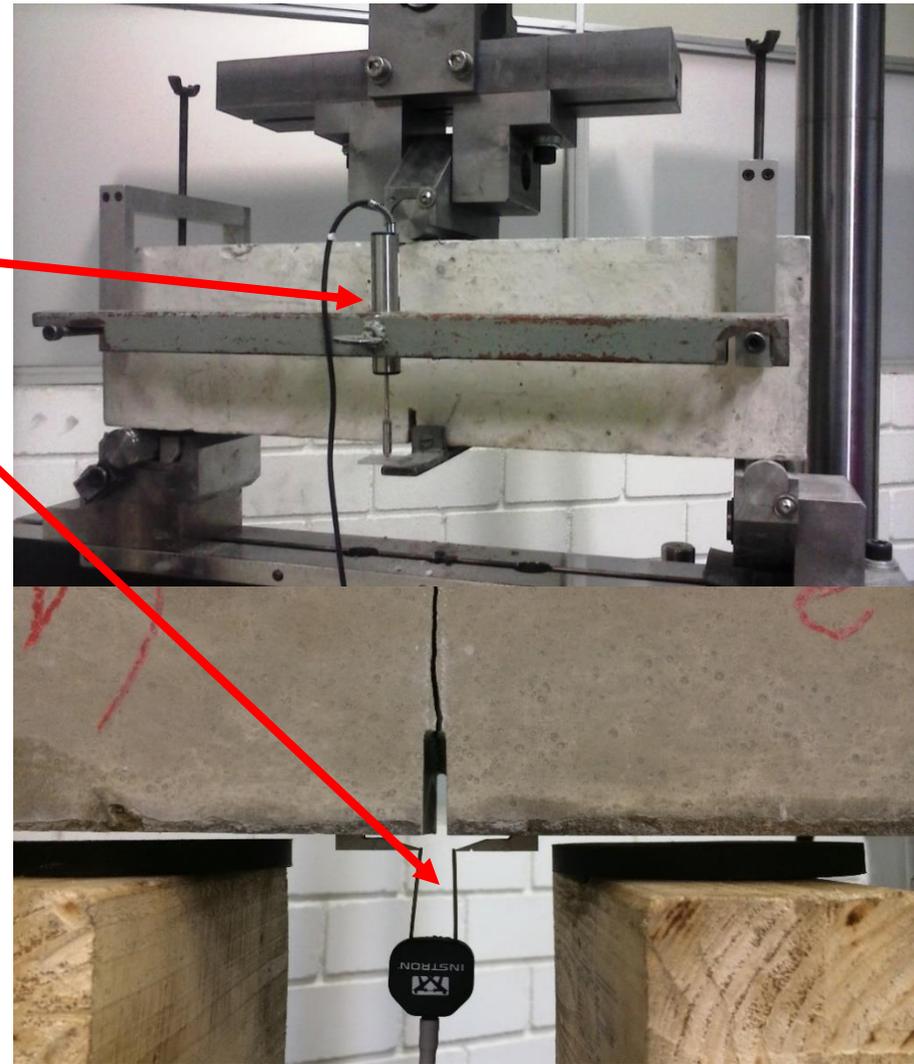
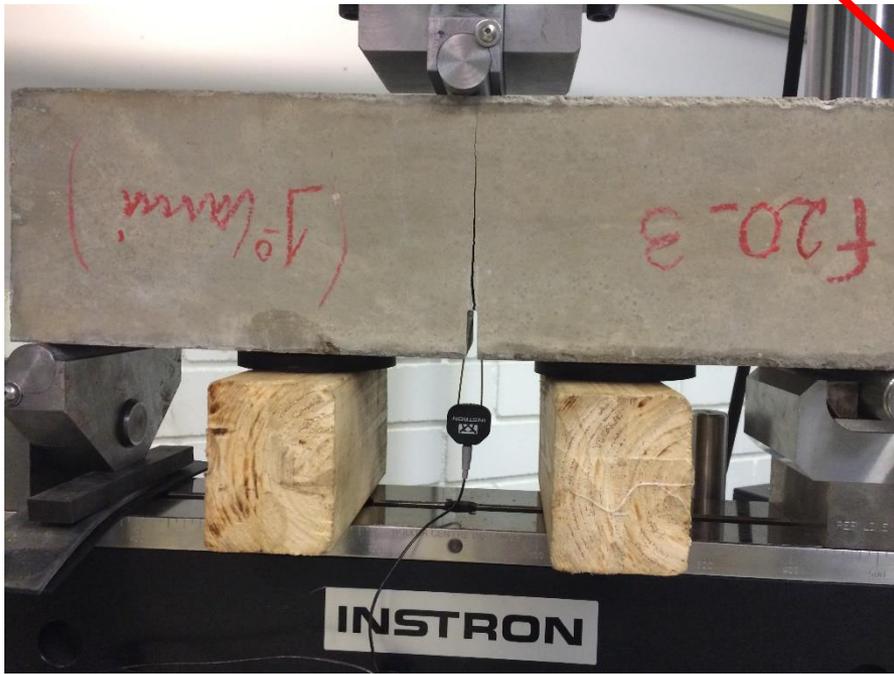
- Velocidade script – 0,2mm/min
- Atingiu 750mm/min



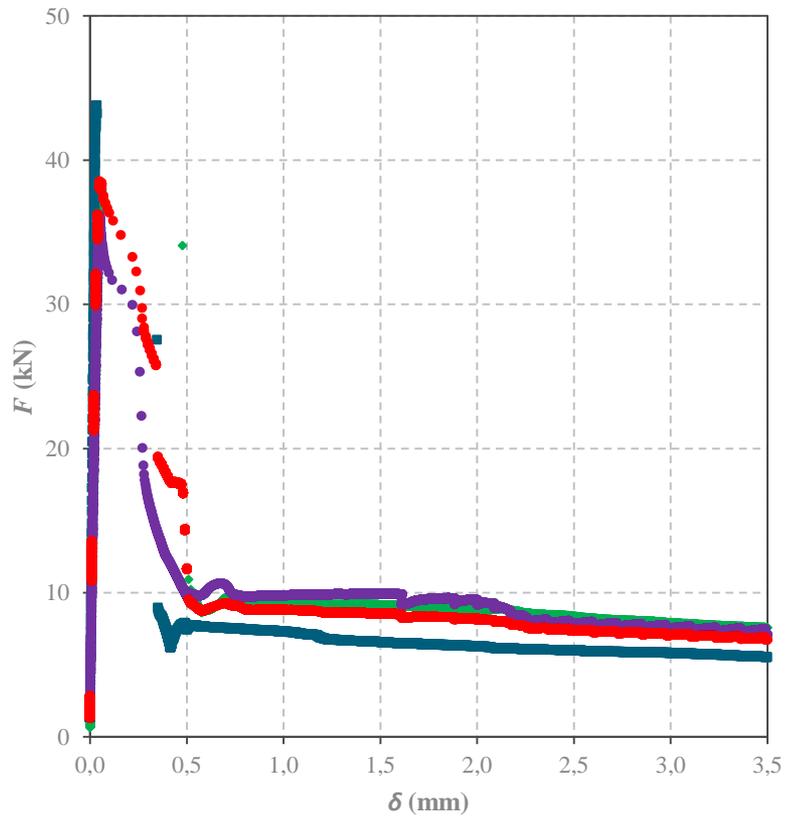
Vel (mm/min)	Tempo(s)	Força(N)	$\delta$ (mm)
0,138	583,46	16320	0
0,206	583,76	16320	0,001031
0,247	584,01	16320	0,002062
0,309	584,21	16308	0,003093
0,476	584,34	16308	0,004124
0,516	584,46	16283	0,005156
0,619	584,56	16270	0,006187
0,884	584,63	16245	0,007218
1,031	584,69	16232	0,008249
1,238	584,74	16207	0,009281
1,547	584,78	16182	0,010312
4,641	584,8	16144	0,011859
9,282	584,81	16107	0,013406
133,032	584,82	15705	0,035578
590,904	584,83	14335	0,134062
751,800	584,84	12513	0,259362
745,560	584,85	10591	0,383622
668,280	584,86	8794,6	0,495002
572,340	584,87	7236,7	0,590392
470,220	584,88	5967,8	0,668762
374,340	584,89	5003,5	0,731152
281,580	584,9	4274,8	0,778082
210,360	584,91	3762,8	0,813142
148,500	584,92	3423,6	0,837892
102,060	584,93	3216,3	0,854902
64,980	584,94	3106,4	0,865732
29,400	584,96	3059,3	0,875532
-0,780	585	3200,6	0,875012
-5,670	585,06	3329,4	0,869342
0,247	585,56	3348,2	0,871402

Medida e controle da:

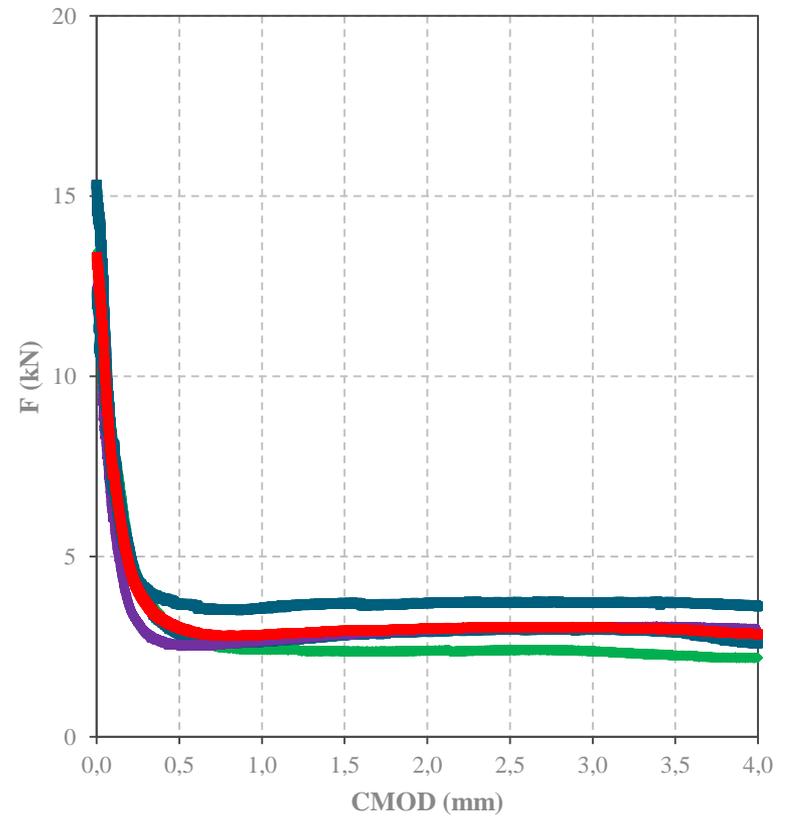
- deflexão ( $\delta$ ) ou
- abertura de fissura (CMOD)



# SHIMADZU ASTM C 1609



# INSTRON EN 14651



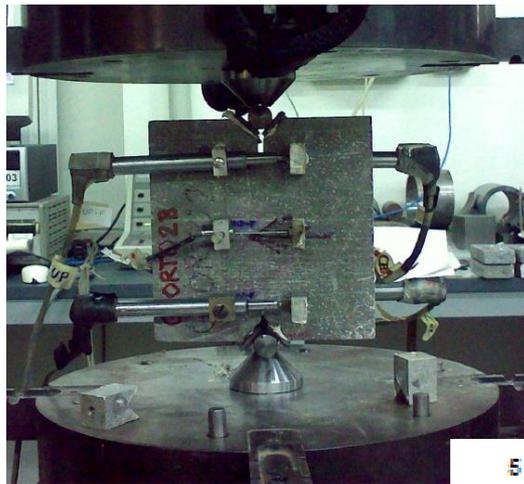
Ensaio realizado com controle fechado

# Sistema de controle baseado na EN14651 pode ser complicado

- Podemos utilizar métodos de ensaio simplificados e correlacionáveis com a EN 14651 para controle corriqueiro
- EN 14651 apenas para dosagem e validação de materiais e processos de produção

**Outros métodos de ensaio  
para caracterização do  
comportamento  
pós-fissuração do CRF**

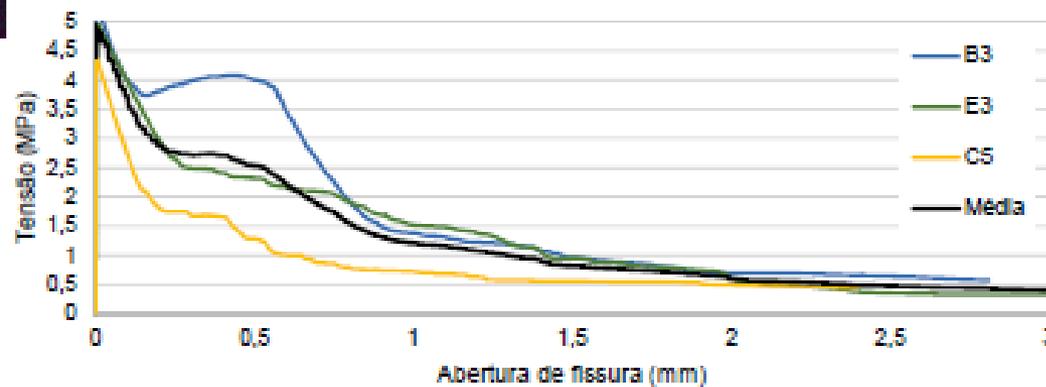
# Compressão diametral com duplo entalhe em cunha - DEWS



Permite avaliar o direcionamento das fibras



(FERRARA, di PRISCO e LAMPERTI, 2010)



# DEWS - Ensaio preparação para o ensaio



Corte a 45°

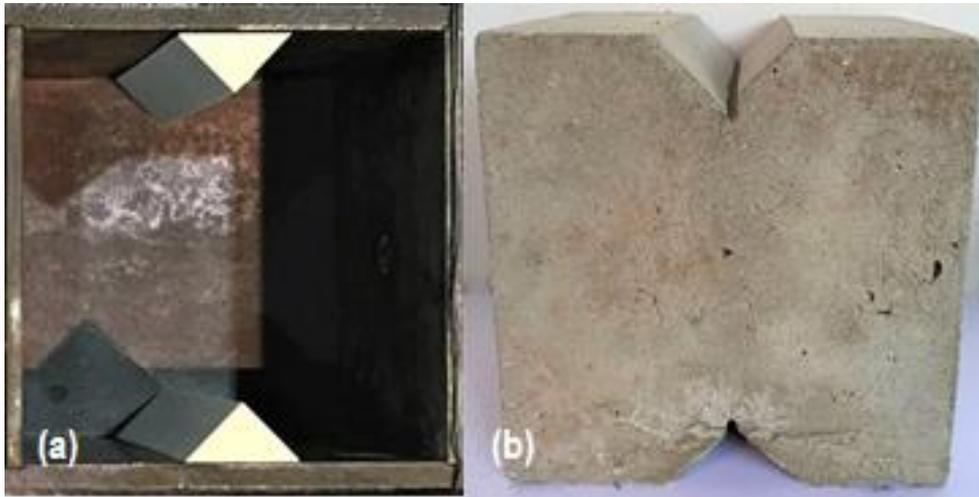


Colagem de chapas



Duplo extensômetro

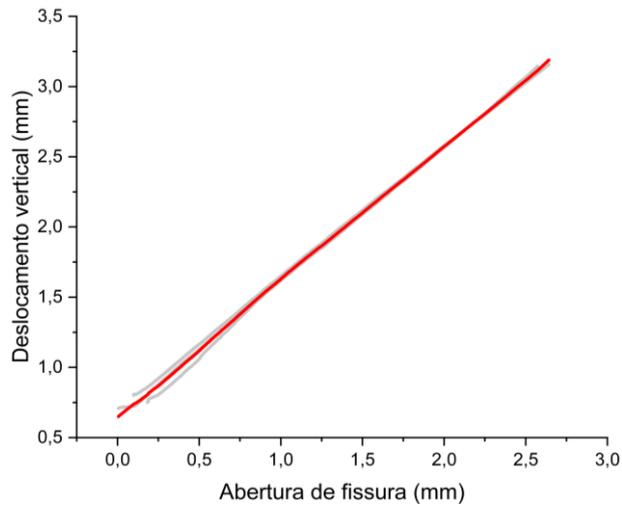
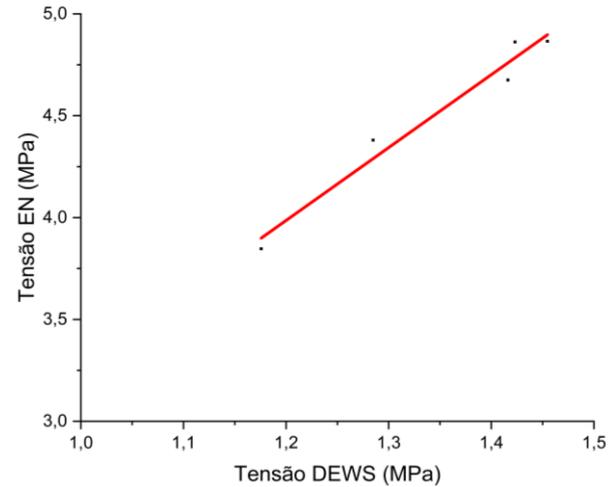
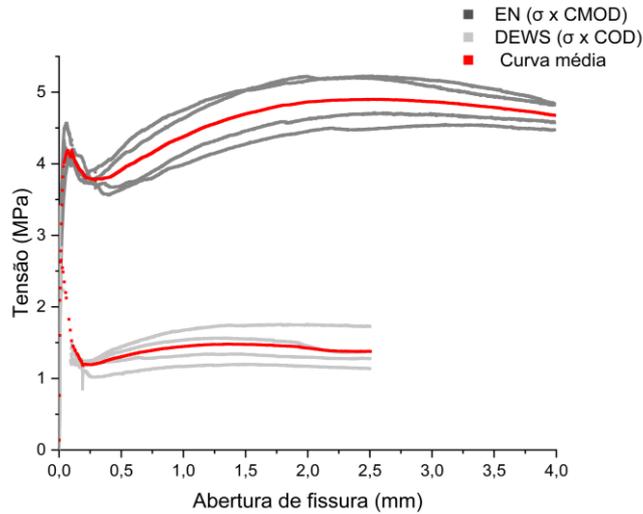
# DEWS – Simplificação do setup



- Moldagem com as cunhas
- Execução apenas do entalhe
- Correlação entre COD e deslocamento vertical da máquina



# Primeiros resultados



$$\sigma_{EN} = 3,35 \times \sigma_{DEWS}$$

$$D = 0,963 \times COD + 0,650$$

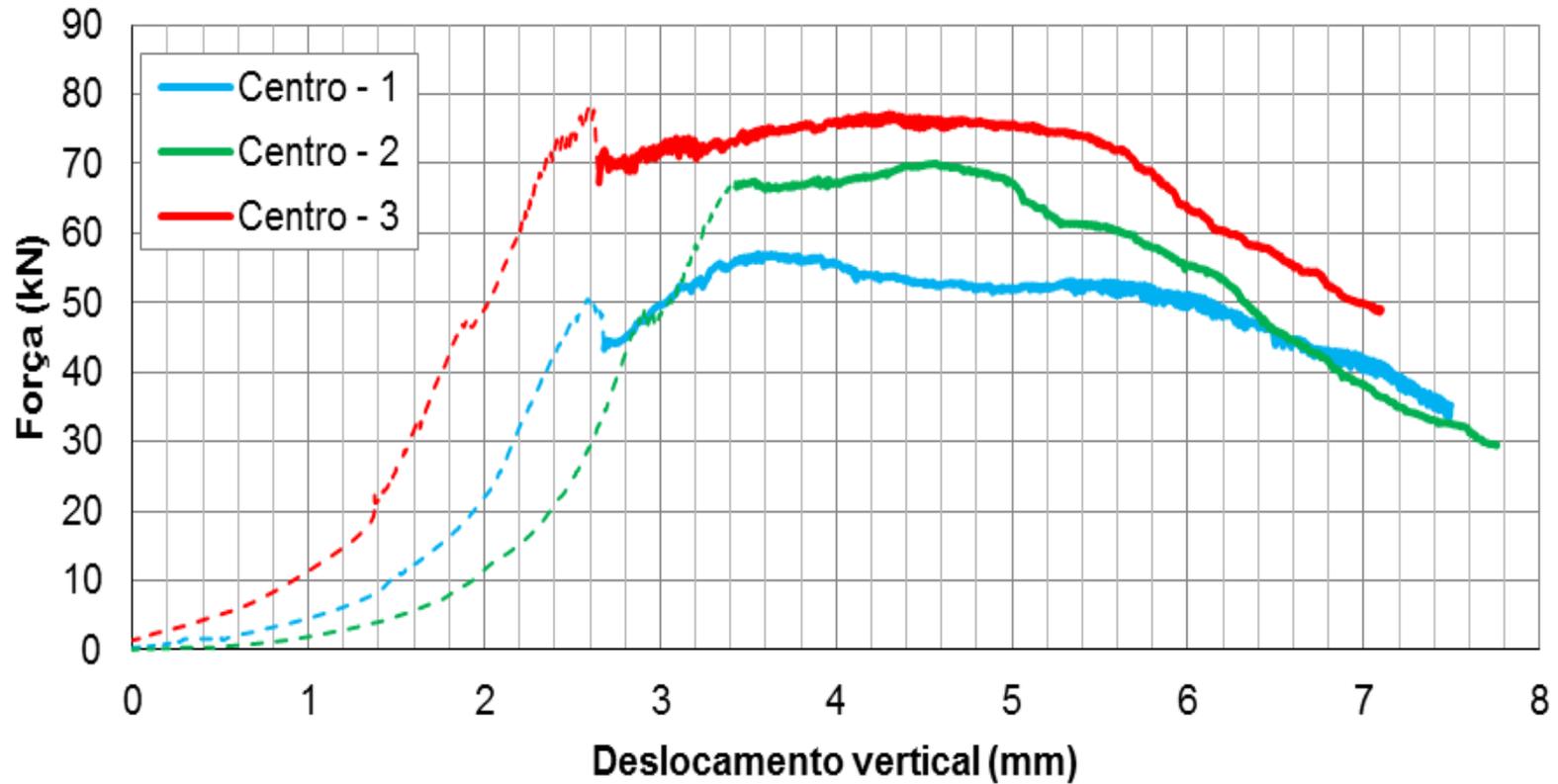
# Punção de placa quadrada



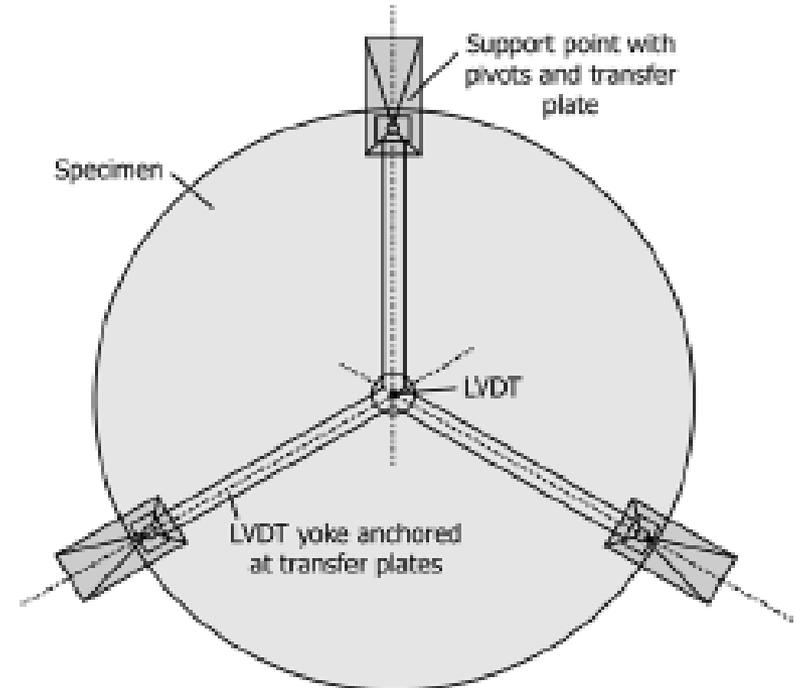
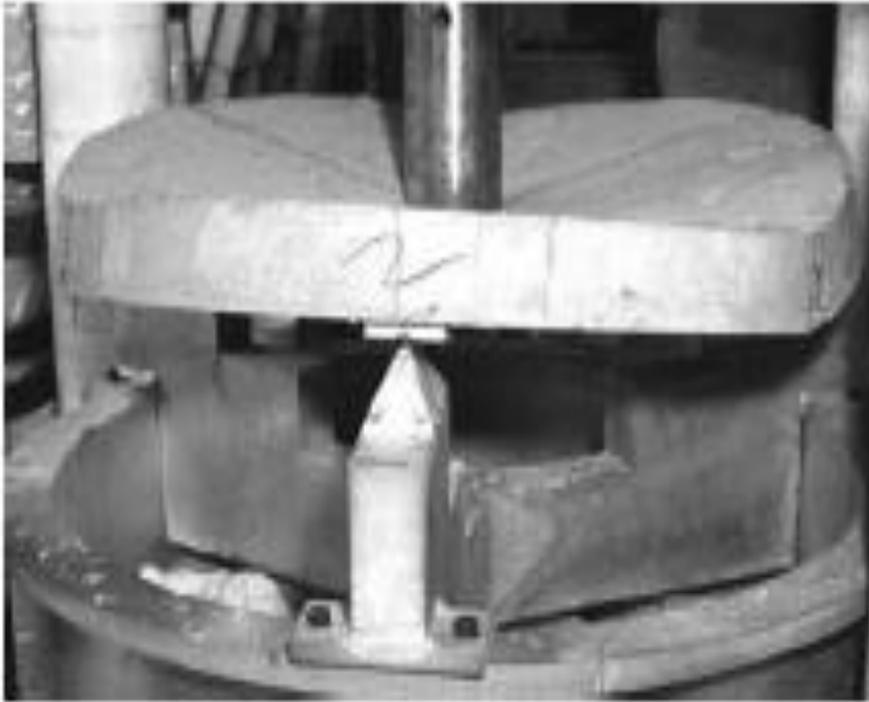
ALFERES FILHO 2016

# Punção de placa quadrada

## Punção - centro



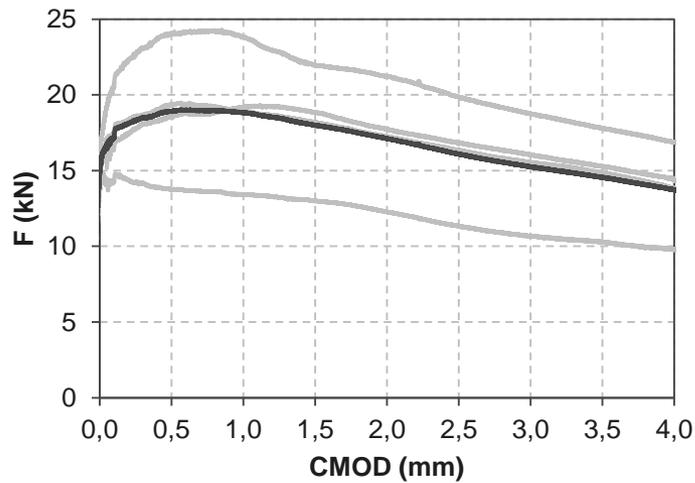
# Punção de placa circular



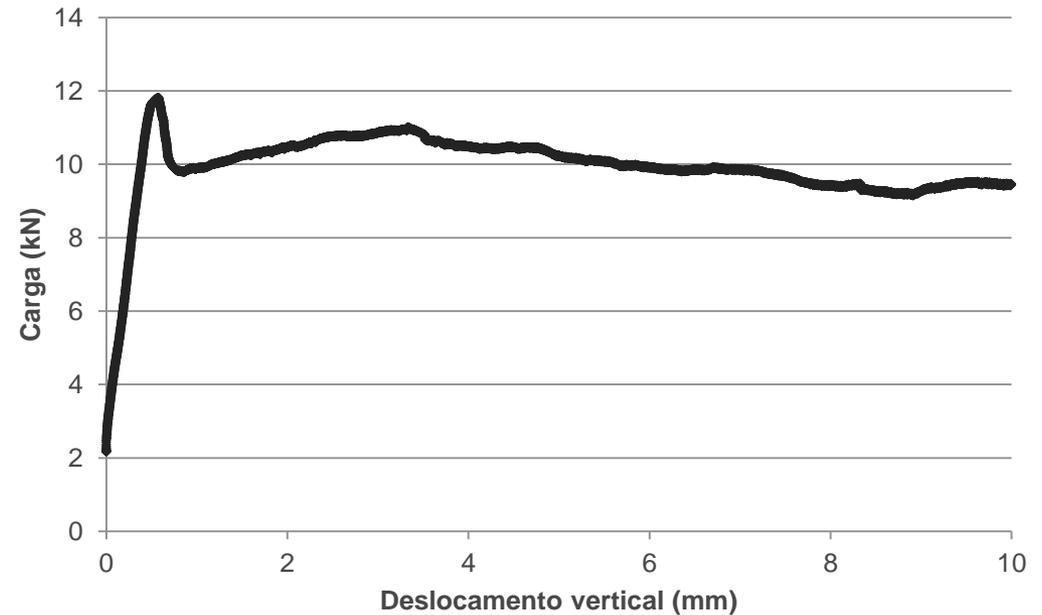
Imagens: ASTM C 1550, 2012

# Montevideú

- Com entalhe, cunha metálica
- Sistema Open-loop, controle do deslocamento vertical
- Em desenvolvimento ...



EN 14651

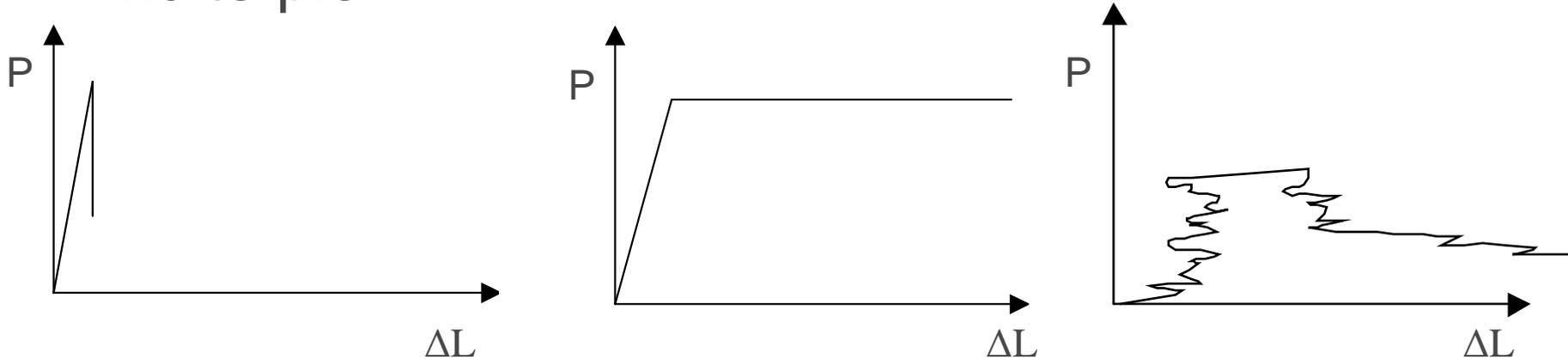


# Dificuldade: controle do CRF

- ✓ No Brasil **mal controlamos a resistência à compressão:**
  - 21 Laboratórios acreditados no INMETRO: 15 SP (CARROMEU et al., 2012)
  - RS - **nenhum acreditado**: 7 laboratórios agrupados em **4 médias diferentes** (MAGALHÃES et al. 2013)
- ✓ Tenacidade e comportamento pós-fissuração é muito pior
  - Não conseguem sequer atender a JSCE-SF4 (GUIMARÃES, 2001)

# Segundo problema: como controlar?

- Tenacidade e comportamento pós-fissuração é muito pior:

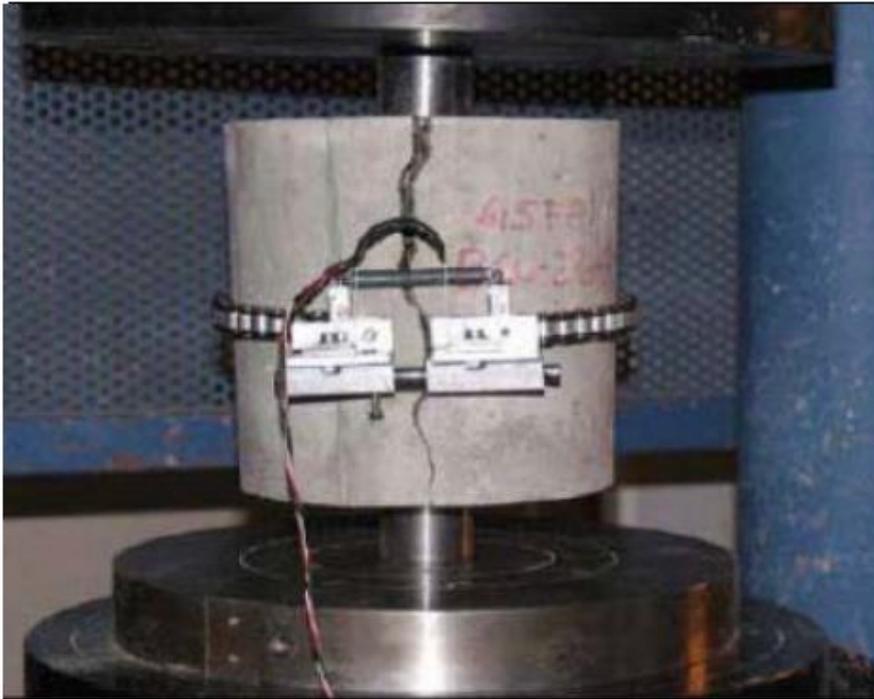


Não consegue com o JSCE-SF4:1984 (Guimarães e Figueiredo, 2002)

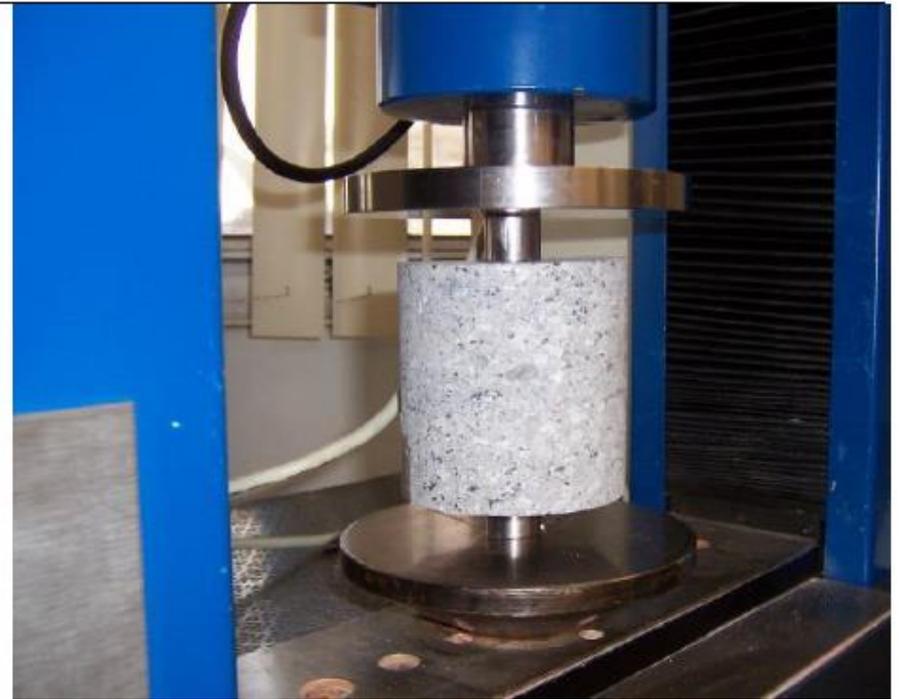
- Poucos laboratórios no Brasil (maioria nas universidades) está capacitada para realizar o ensaio EN14651.

**Quais métodos de ensaio  
são viáveis de se utilizar  
em uma futura  
normalização ou  
especificação brasileira?**

# Duplo puncionamento (Ensaio Barcelona)



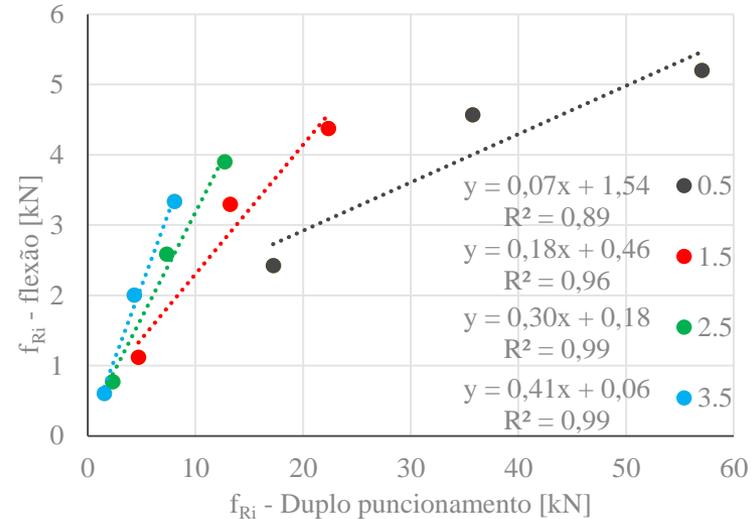
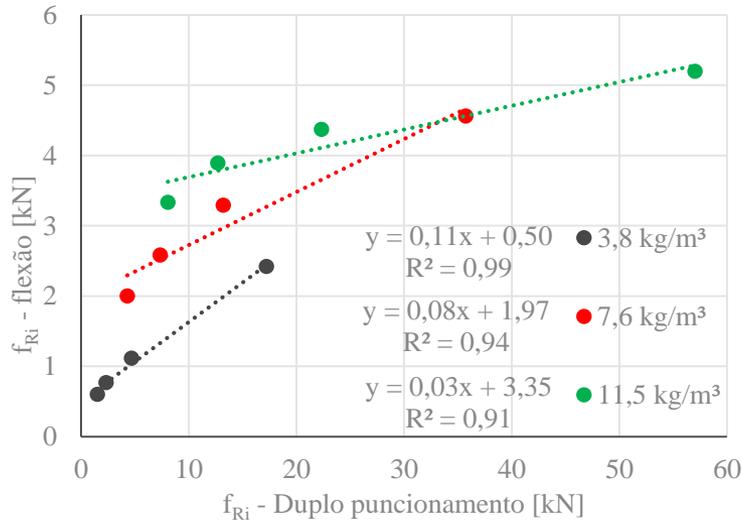
**Ensaio Barcelona**  
**Cinta extensométrica**  
UNE 83515, 2010



**Ensaio duplo puncionamento**  
**Deslocamento vertical da máquina**  
**de ensaio**

Chen (1970) medida indireta da resistência à tração do concreto simples

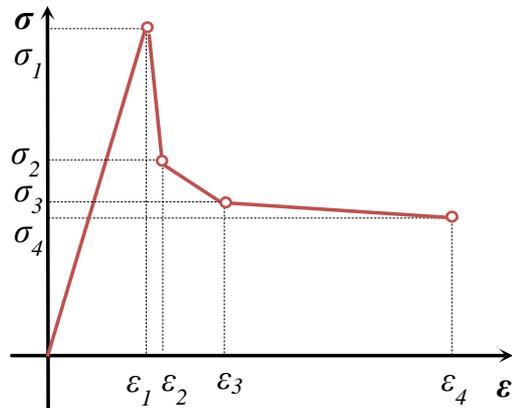
# Correlação produzida nos ensaios prévios



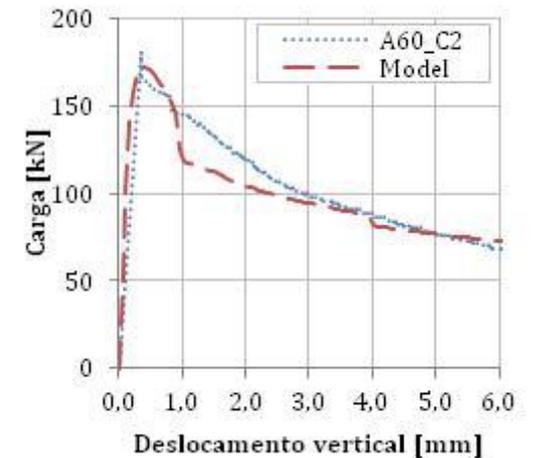
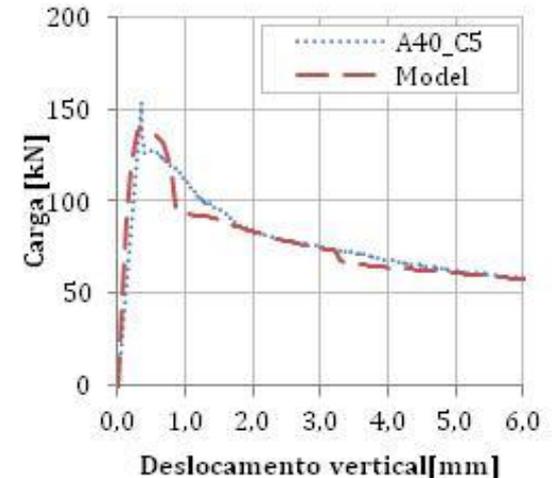
É uma correlação específica para o concreto e fibra que serão adotados no projeto

Resultados do **controle com o duplo puncionamento** são introduzidos nas equações e o projetista pode avaliar o valor equivalente na flexão

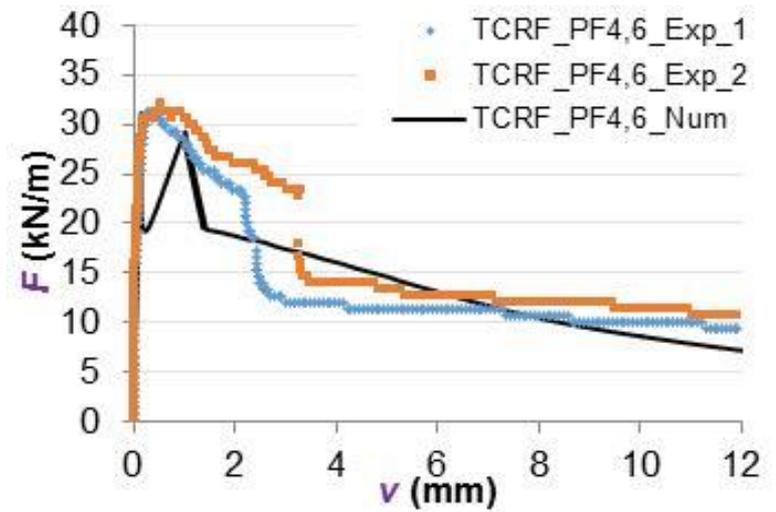
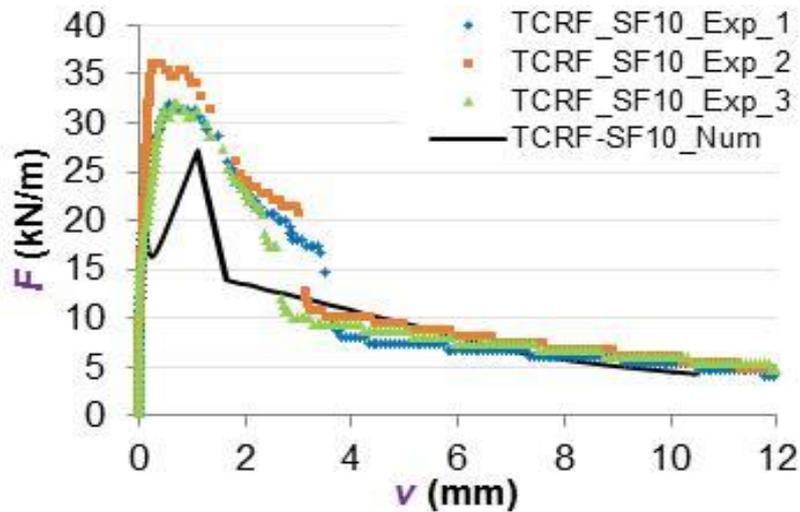
# Modelo constitutivo simplificado baseado no ensaio Barcelona



Deformação [‰]	Tensão [MPa]
$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{cm}}$	$\sigma_1 = \frac{F_{Pmax}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \text{sen } \beta}{\text{sen } \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$
$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 0.1$	$\sigma_2 = \frac{F_{P0.02mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \text{sen } \beta}{\text{sen } \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$
$\varepsilon_3 = 4.0$	$\sigma_3 = \frac{F_{P0.75mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \text{sen } \beta}{\text{sen } \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$
$\varepsilon_4 = 20$	$\sigma_4 = \frac{F_{P4.00mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \text{sen } \beta}{\text{sen } \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$



# Simulação comportamento dos TCRF com parâmetros CRF do ensaio Barcelona



Fonte: MONTE (2015)

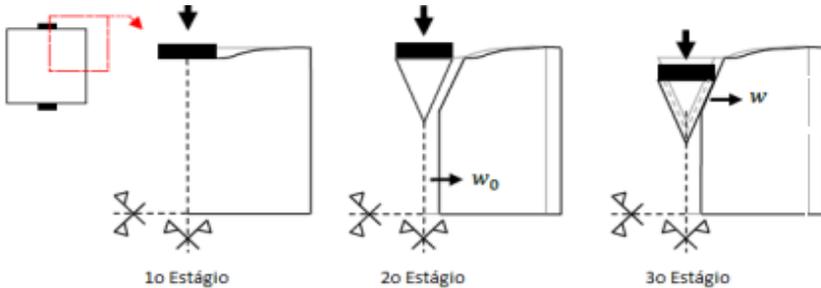
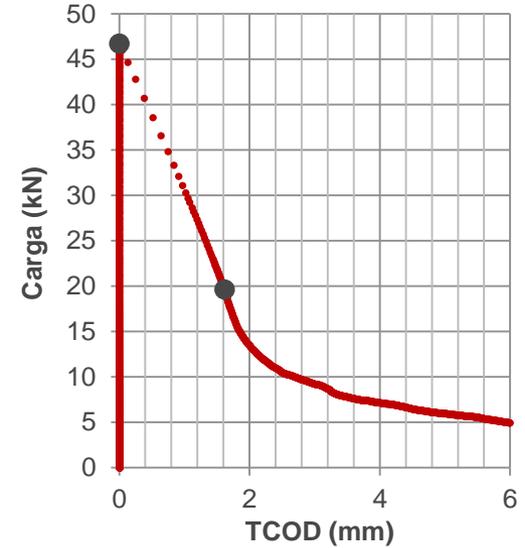
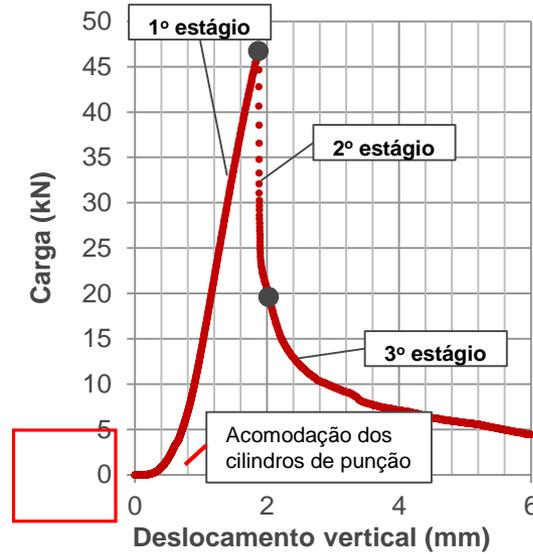
# Características do método normalizado na UNE 83515

- ✓ Duplo puncionamento de cilindros
- ✓ Corpo de prova de diâmetro igual à sua altura
- ✓ 150 mm – moldado; permite 100 mm – extraído
- ✓ Aplicação de carga uniforme com velocidade de descida da máquina de ensaio de  $(0,5 \pm 0,05)$  mm/min
- ✓ Surgem entre 2 a 4 fissuras
- ✓ **Medida do deslocamento diametral (TCOD) - cinta extensométrica**

# Características do método prática recomendada Ibracon/Abece

- ✓ Duplo puncionamento de cilindros
- ✓ Corpo de prova de diâmetro igual à sua altura
- ✓ 150 mm – moldado; permite 100 mm – extraído
- ✓ Aplicação de carga uniforme com velocidade de descida da máquina de ensaio de  $(0,5 \pm 0,05)$  mm/min
- ✓ Surgem entre 2 a 4 fissuras
- ✓ **Medida do deslocamento vertical ( $\delta$ ) – máquina de ensaio**

# Deslocamento vertical ( $\delta$ ) x TCOD



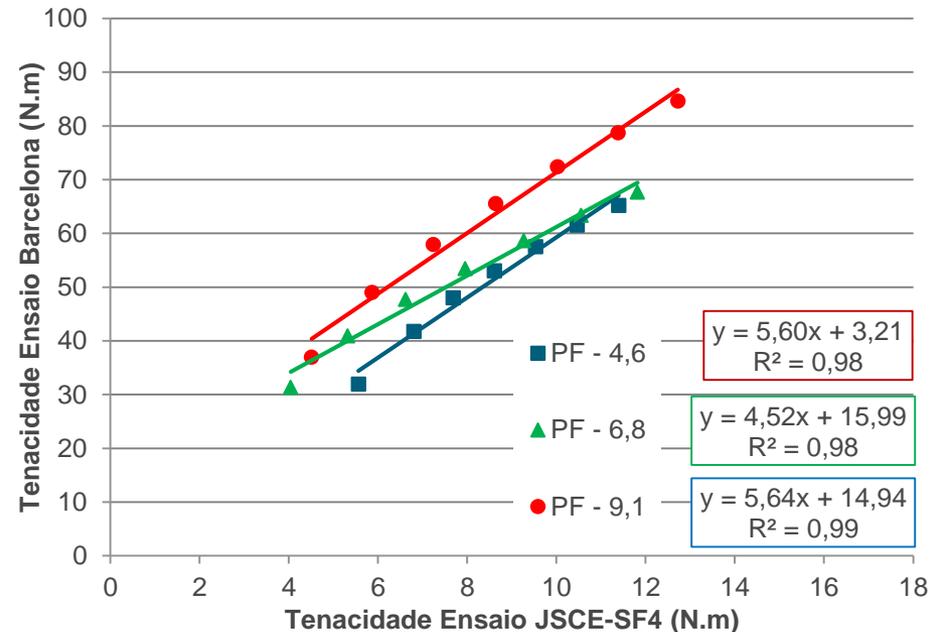
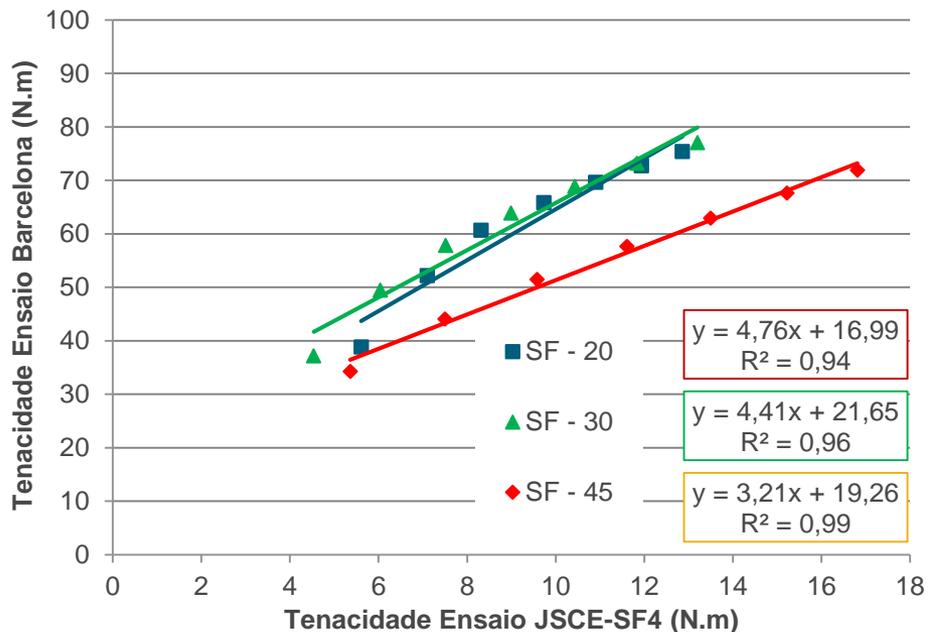
## Conversão analítica

$$\text{TCOD} = 0 \quad \delta_p \leq \delta_{p,cr}$$

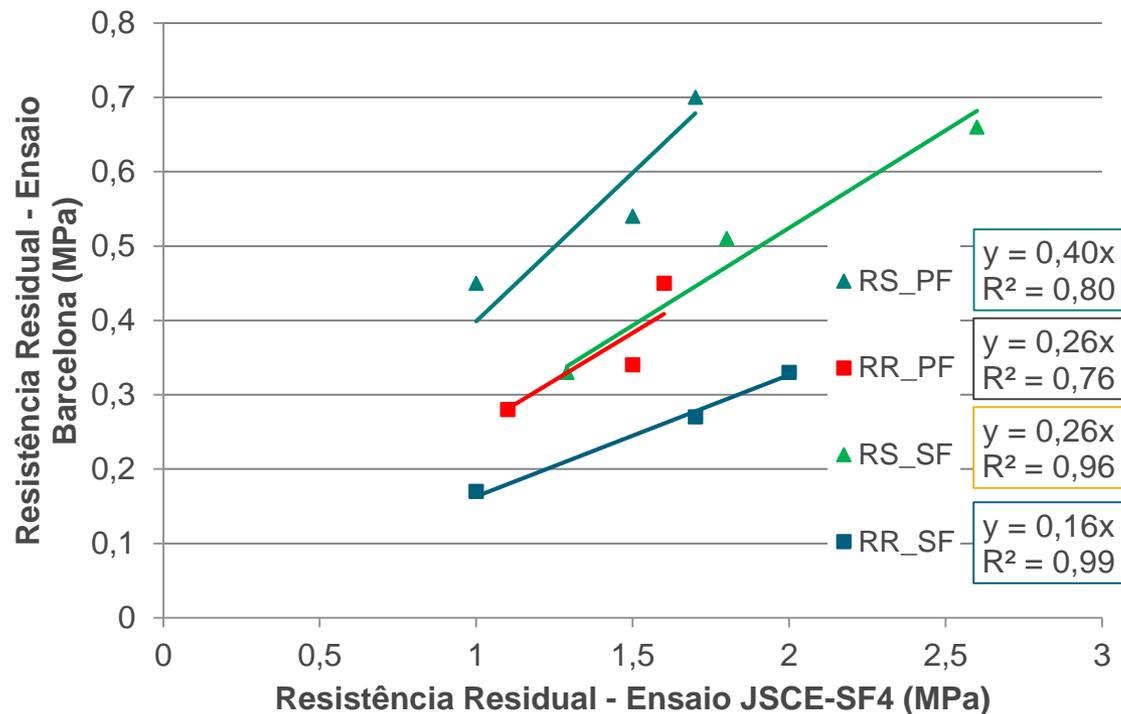
$$\text{TCOD} = n \times \frac{a \times \delta_{p,R,0}}{2 \times l} \times \text{sen} \frac{\pi}{n} \left( 1 - \frac{P}{P_{cr}} \right) \quad \delta_{p,cr} < \delta_p < \delta_{p,R,0}$$

$$\text{TCOD} = n \times \frac{a}{2 \times l} \times \text{sen} \frac{\pi}{n} \left[ \delta_p - \delta_{p,cr} + \delta_{p,R,0} \times \left( 1 - \frac{P_{R,0}}{P_{cr}} \right) \right] \quad \delta_p \geq \delta_{p,R,0}$$

# Correlação entre os ensaios: JSCE x Duplo puncionamento - Energia



# Correlação entre os ensaios: JSCE x Duplo puncionamento - Resistência residual



Fonte: Monte, Toaldo, Figueiredo (2014)

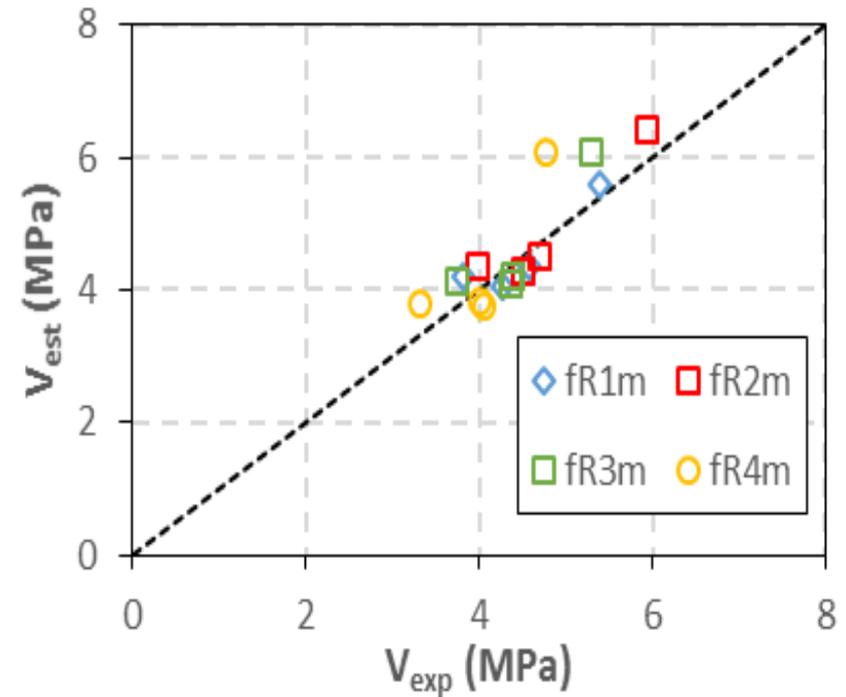
# Flexão X duplo puncionamento

$$f_{R,i} = \frac{E_{BCN,0.5}}{\left[ A + B \cdot \left( \frac{F_{BCN,0.5}}{F_{BCN,cr}} \right) \right]} + C$$

$$A = -1148.93 \cdot CMOD^2 + 473.72 \cdot CMOD - 2165.34$$

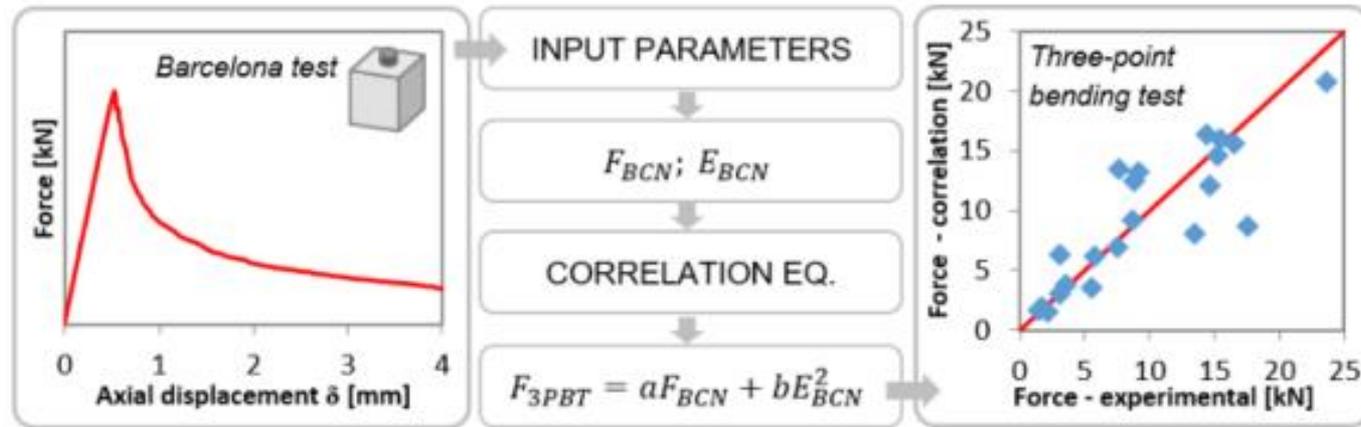
$$B = 1889.31 \cdot CMOD^2 - 791.03 \cdot CMOD + 3617.56$$

$$C = -0.14 \cdot CMOD^2 + 0.48 \cdot CMOD + 3.80$$



**Não é uma correlação  
geral**

# Flexão X duplo puncionamento

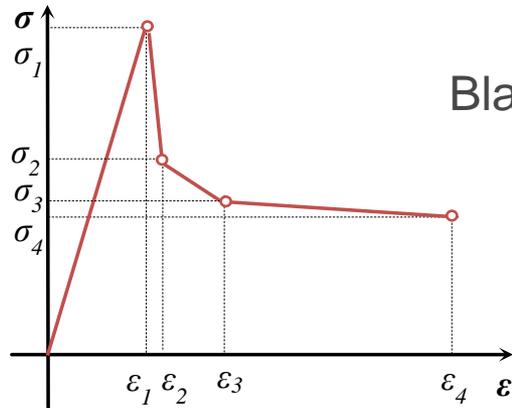


**Table 4**  
Constants and confidence interval of Eq. (2).

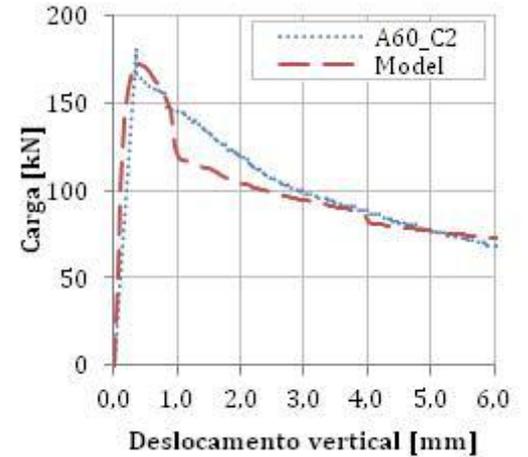
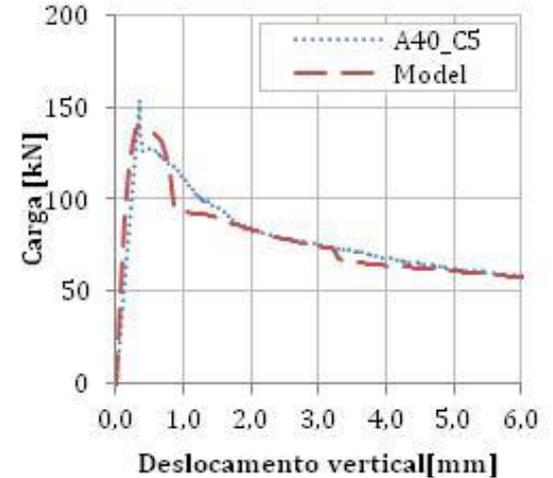
$i$ (mm)	$a$	$b$	CI <sub>99%</sub> (kN)	R	R <sup>2</sup>
1.5	1.76E-01	-3.29E-04	2.00	0.86	0.74
2.5	1.45E-01	4.70E-06	1.67	0.89	0.79
3.5	1.52E-01	1.46E-05	1.65	0.87	0.76

É uma correlação geral, mas  
não apresentou bons  
resultados para 0,5 mm

# Modelo constitutivo simplificado baseado no ensaio Barcelona

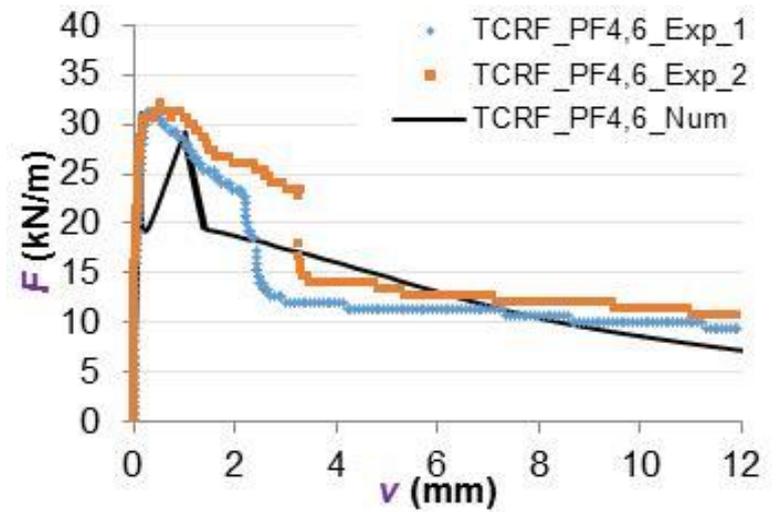
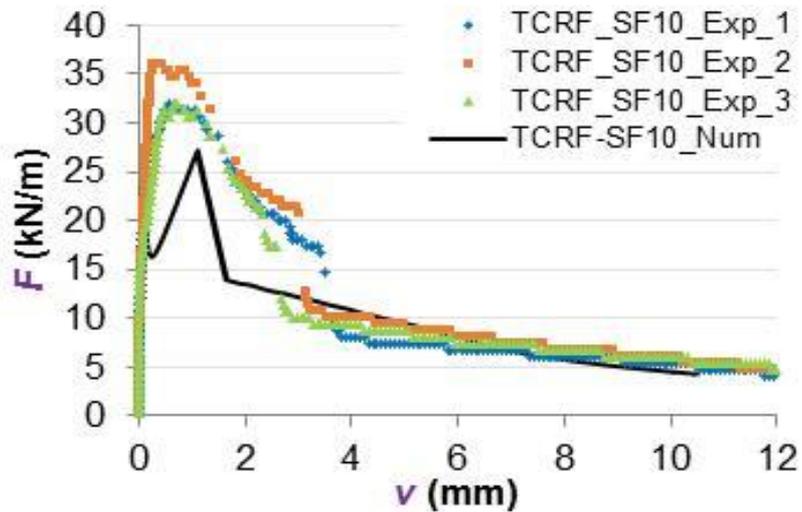


Blanco et al., (2014)



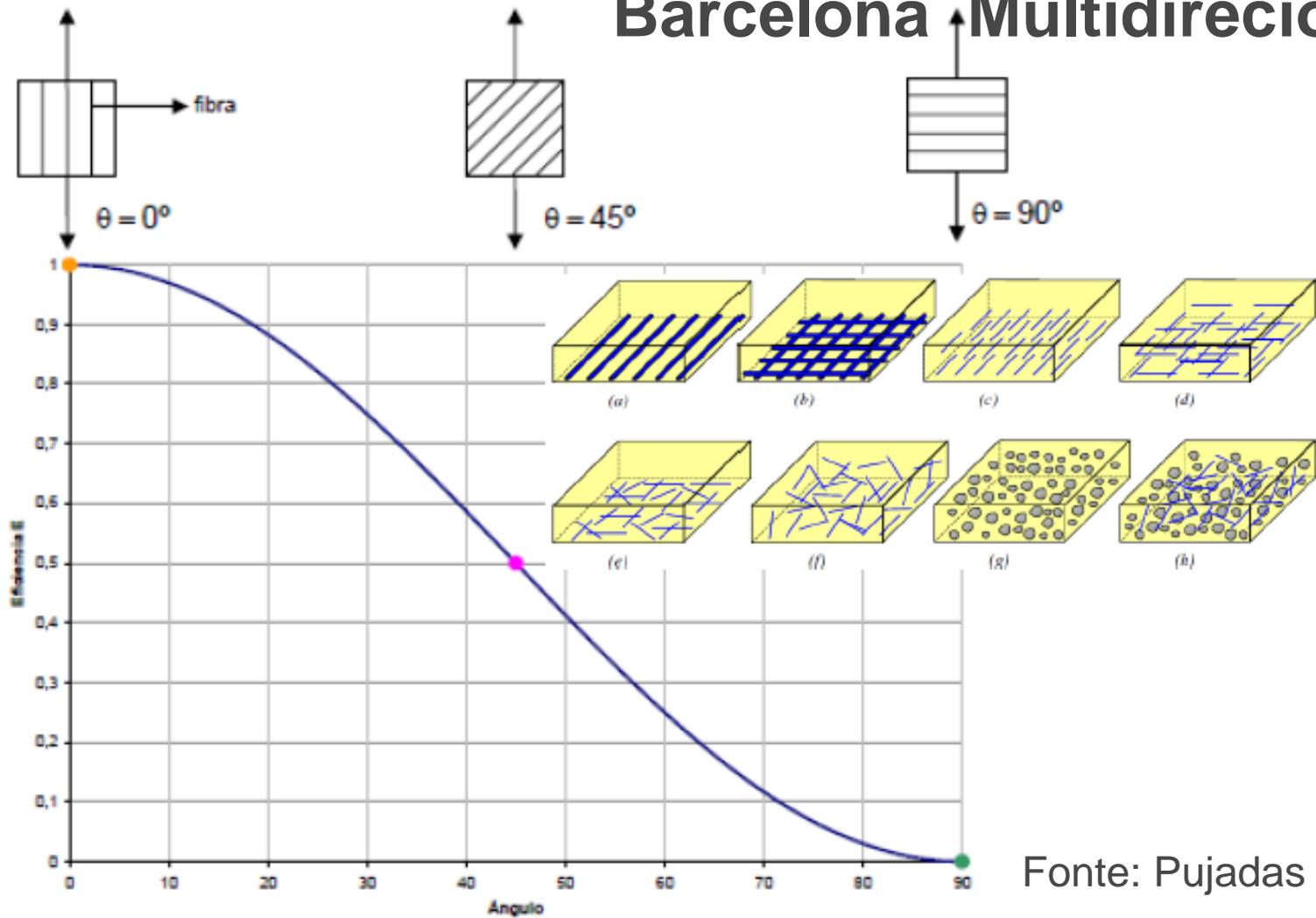
Deformação [‰]	Tensão [MPa]
$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{cm}}$	$\sigma_1 = \frac{F_{Pmax}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \sin \beta}{\sin \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$
$\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0.1$	$\sigma_2 = \frac{F_{P0.02mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \sin \beta}{\sin \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$
$\epsilon_3 = 4.0$	$\sigma_3 = \frac{F_{P0.75mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \sin \beta}{\sin \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$
$\epsilon_4 = 20$	$\sigma_4 = \frac{F_{P4.00mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \sin \beta}{\sin \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$

# Simulação comportamento dos TCRF com parâmetros CRF do ensaio Barcelona

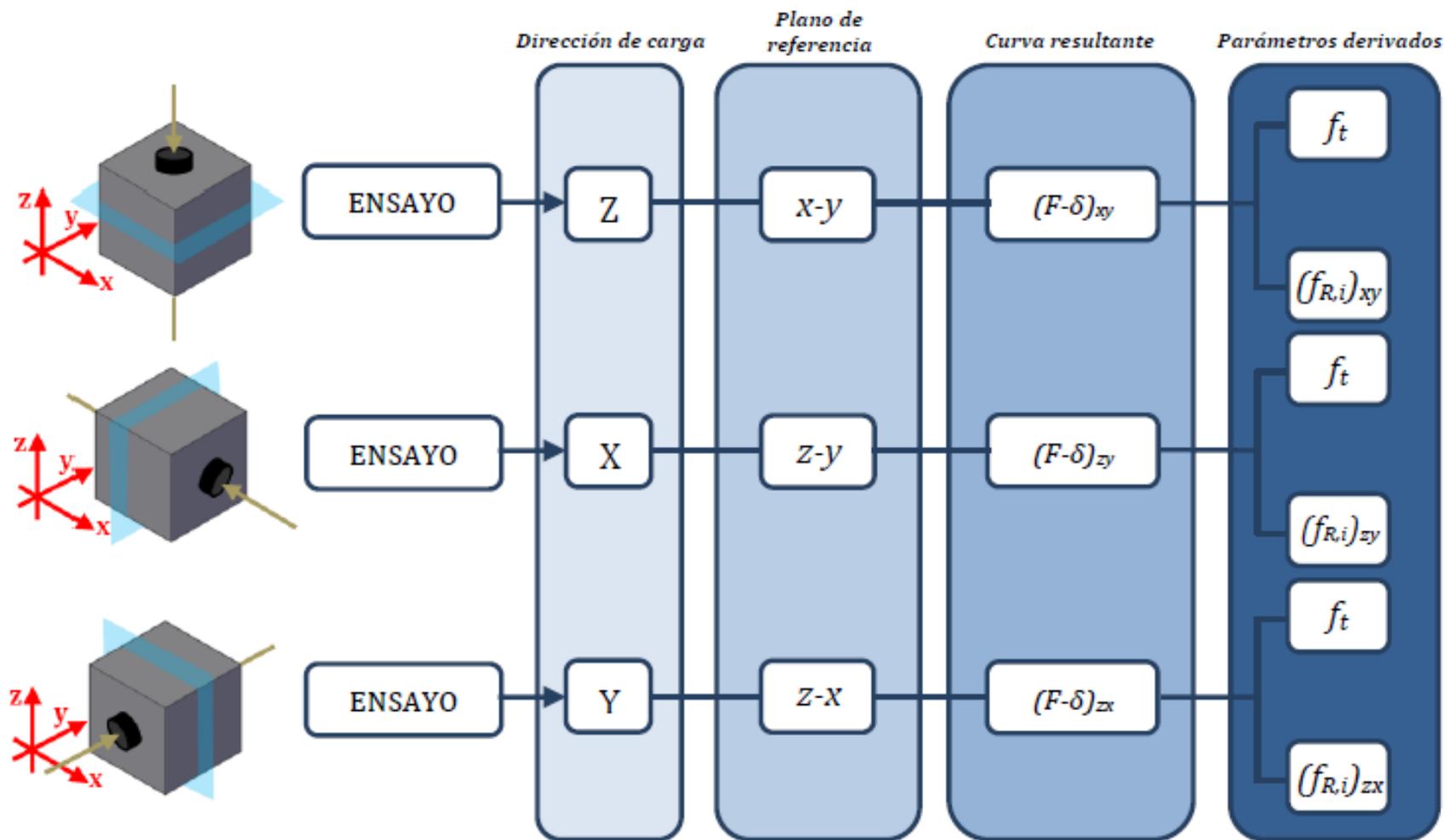


MONTE (2015)

# Barcelona Multidirecional



Fonte: Pujadas (2013)



Fonte: Pujadas, 2013

# **Controle para obras com CRF**

# Controle do CRF

- Princípios básicos
  - ✓ Parametrização do comportamento através do **ensaio de flexão três pontos com entalhe**
  - ✓ Parametrização do comportamento através do **ensaio de duplo puncionamento**
  - ✓ Estabelecida uma correlação entre estes ensaios, o ensaio de duplo puncionamento pode ser adotado para o controle de qualidade do CRF

# Controle do CRF

- Parametrização do comportamento através do **ensaio de flexão três pontos com entalhe**
  - O desafio é a disseminação do ensaio para além das universidades e centros de pesquisa
  - Investimento em máquinas de ensaio com sistema de controle fechado e qualificação dos técnicos

# Controle do CRF

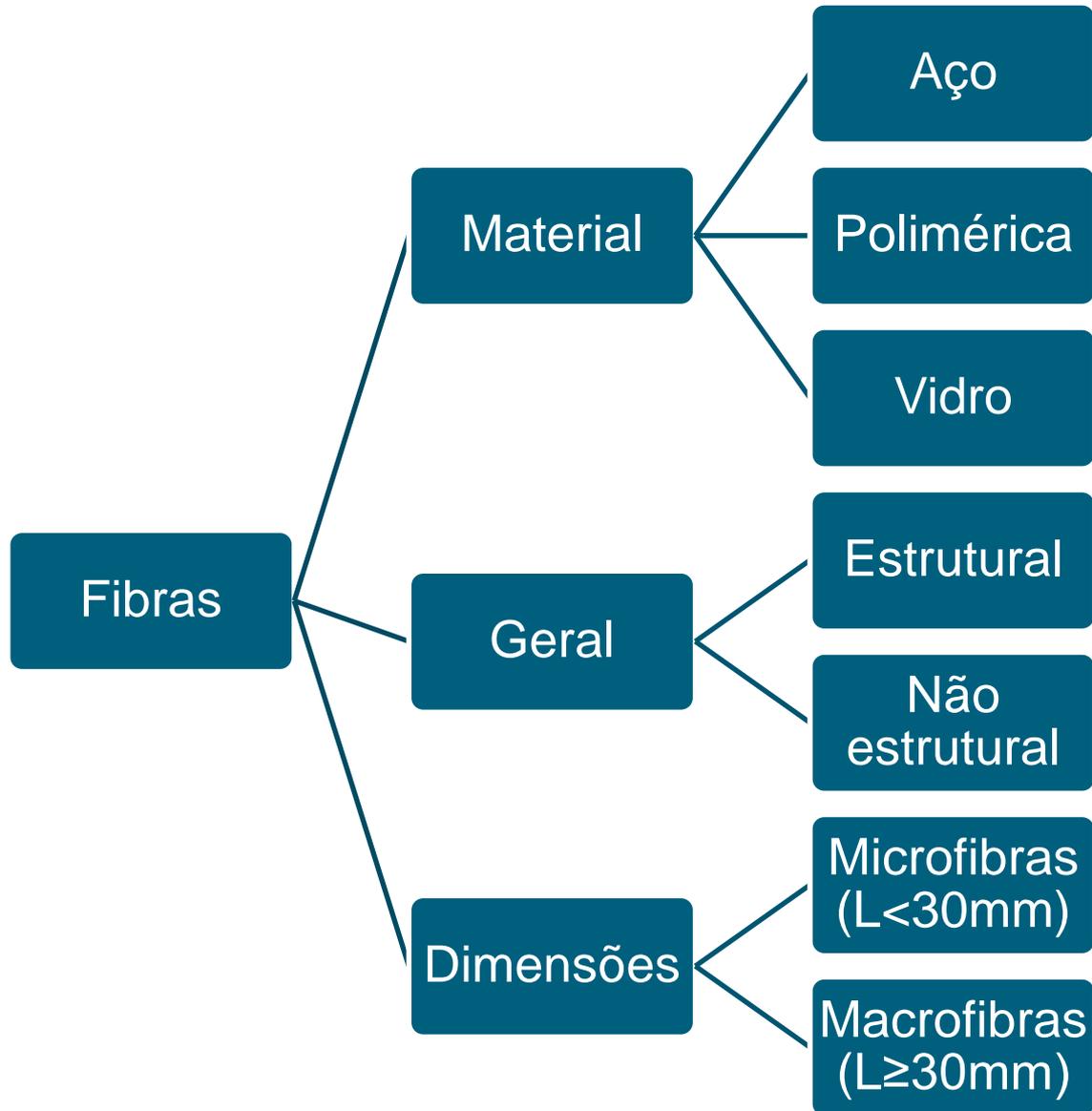
- **Parametrização do comportamento através do ensaio de duplo punção**
  - **A disseminação do ensaio é um pouco mais simples**
  - **Investimento em máquinas de ensaio com sistema de controle por deslocamento e aquisição de dados**
  - **Avaliação da robustez do ensaio**
    - **Diferenças nas máquinas de ensaio (mestrado recém concluído)**
    - **Repetibilidade e reprodutibilidade (mestrado em andamento)**

# Considerações sobre controle do comportamento mecânico

- Buscar correspondência com métodos já consagrados;
- Aderência aos modelos constitutivos do elemento estrutural;
- Simplicidade;
- **Repetibilidade;**
- **Reprodutibilidade;**
- Fácil implementação.

**Continuidade das pesquisas e urgência de normalização**

# Tipos de fibras e classificação



# Tipos de fibras

Fibras de aço



Fibras de vidro



Macrofibras de PP



## **Histórico**

- Fibras de aço tem maior histórico como material de reforço para aplicações estruturais.
- Isto gera uma fundamentação de comportamento baseado na interação fibra X matriz.
- Isto governa as exigências para a fibra.

# Primeira especificação (e única) brasileira de fibras: fibras de aço

- Norma NBR 15530:07 – Fibras de aço para concreto - Especificação.
- Estabelece parâmetros de classificação para as fibras de aço de baixo teor de carbono e dispõe sobre os requisitos mínimos de:
  - ✓ forma geométrica;
  - ✓ defeitos de fabricação;
  - ✓ tolerâncias dimensionais e
  - ✓ resistência à tração e dobramento.

# Escopo e abrangência da norma

- Com isto, procura-se garantir que as fibras em conformidade com estes requisitos tenham potencial para proporcionar um desempenho adequado ao CRFA, **desde que sejam observados os cuidados com a dosagem e controle do material.**

# Classificação das fibras de aço

## TIPOS:

- Tipo A: fibra de aço com ancoragens nas extremidades



- Tipo C: fibra de aço corrugada



- Tipo R: fibra de aço reta



# Classificação das fibras de aço

## CLASSES:

- Classe I: fibra oriunda de arame trefilado a frio
- Classe II: fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio
- Classe III: fibra oriunda de arame trefilado e escarificado

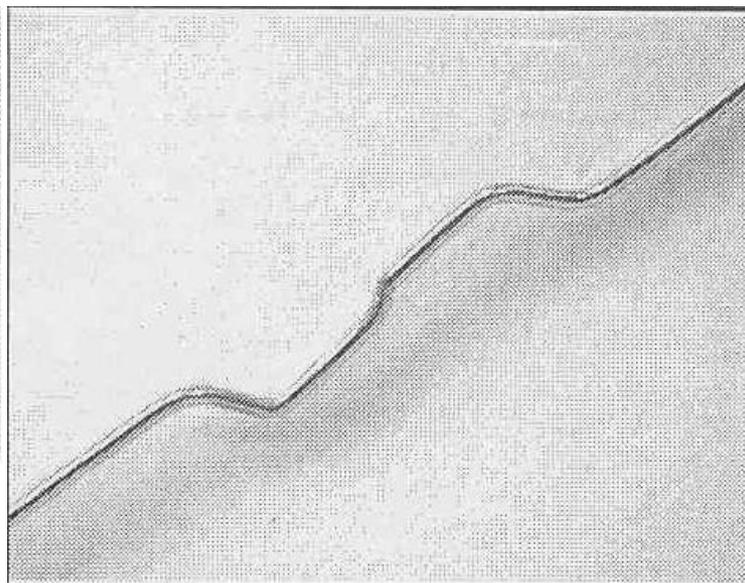
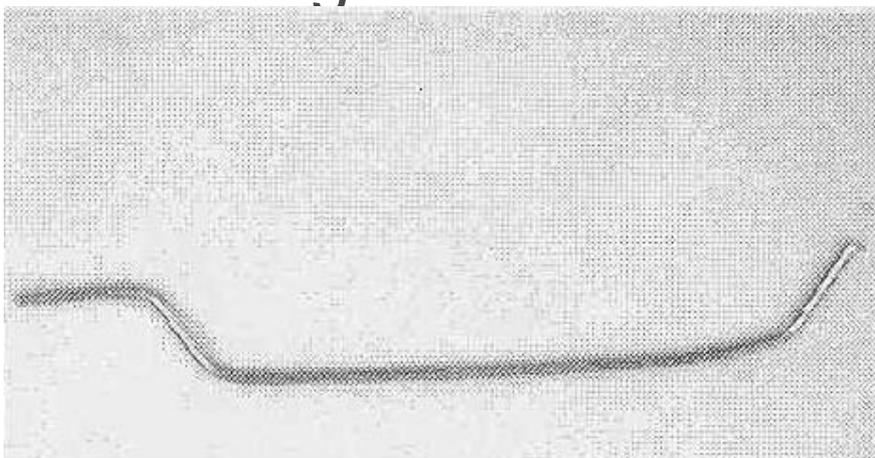
# Designações

Tipo (geometria)	Classe da fibra	Fator de Forma mínimo $\lambda$	Limite de resistência a tração do aço MPa $(*)f_u$
A	I	40	1000
	II	30	500
C	I	40	800
	II	30	500
	III	30	800
R	I	40	1000
	II	30	500

(\*)Esta determinação deve ser feita no aço, no diâmetro equivalente final imediatamente antes do corte.

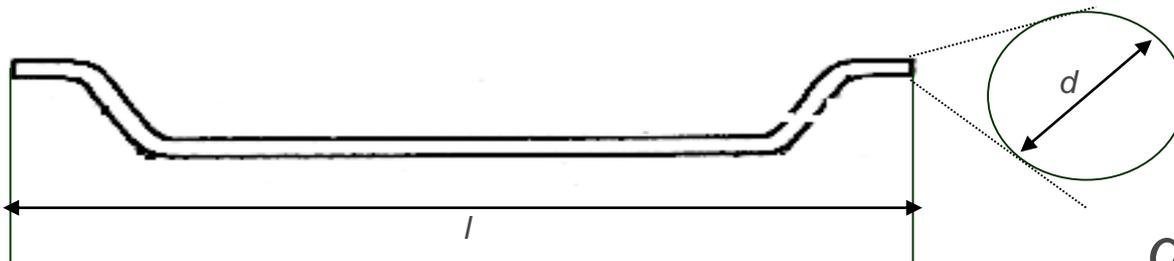
# Verificação de defeitos

- Deve ser executada para cada lote em uma amostra de no mínimo 200 gramas.
- São consideradas defeituosas fibras de qualquer tipo que estiverem emendadas pelo topo, ou as fibras Tipo A que não apresentarem ancoragem.



# Tolerâncias dimensionais

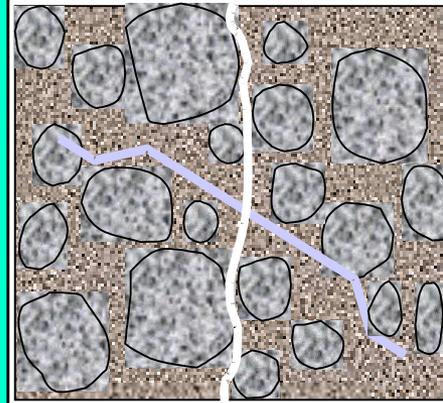
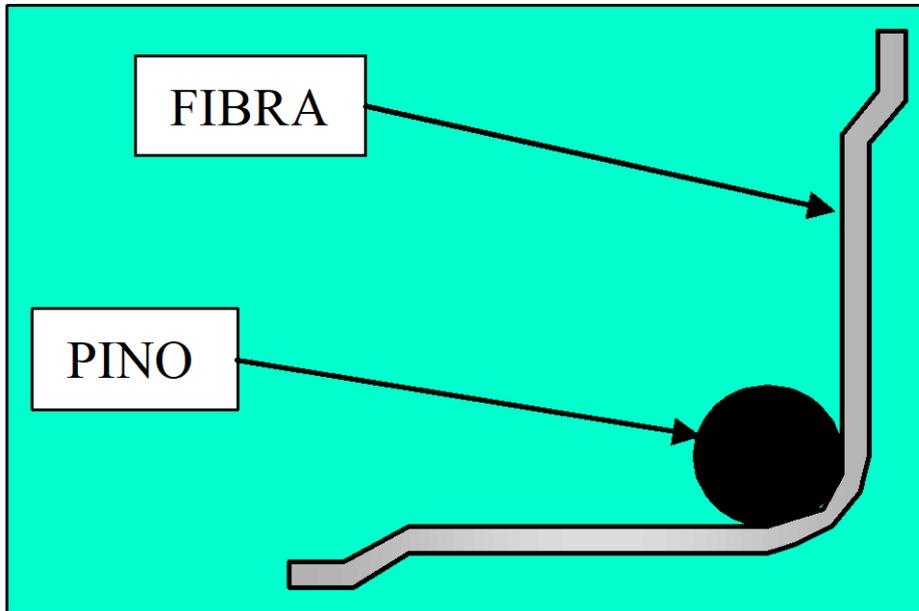
- A variação permitida para  $l$  é de  $\pm 5\%$ .
- Para fibras com comprimento menor ou igual a 35 mm a variação permitida para o comprimento ( $l$ ) é de  $\pm 10\%$  (As medições devem ser feitas nas fibras sem nenhuma retificação).
- A variação máxima permitida para os valores de  $d_e$  em relação ao valor nominal é de 5%.
- A variação máxima permitida para a diferença entre as medidas  $d_1$  e  $d_2$  é de 4%.



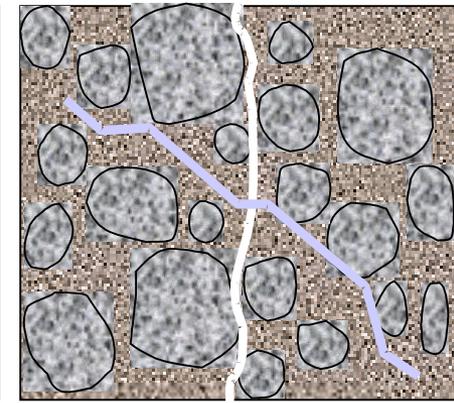
$$d_e = d_1 + d_2$$

# Resistências

- Ao dobramento (não pode haver quebras).



Fibra frágil



Fibra dúctil

# Aceitação ou rejeição

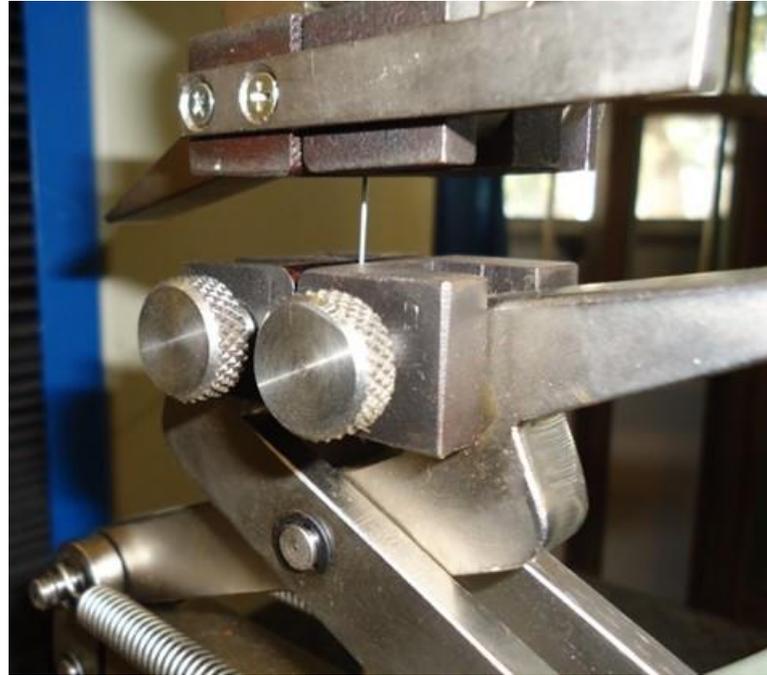
Ensaio	Amostragem mínima	% mínima de fibras conformes
Dobramento	10 fibras	90
Verificação dimensional	60 fibras	90
Verificação de defeitos	200g	95

## Alguns problemas:

- A norma é muito rigorosa e alguns fabricantes brasileiros (vários estrangeiros) não conseguiam atender aos requisitos dimensionais.
- A resistência à tração era medida no fio e isto fica restrito ao fabricante.
- Não está compatível com as tendências atuais ISO

## ENSAIO DE TRAÇÃO:

Tem-se dificuldade do ensaio devido as pequenas dimensões das fibras.

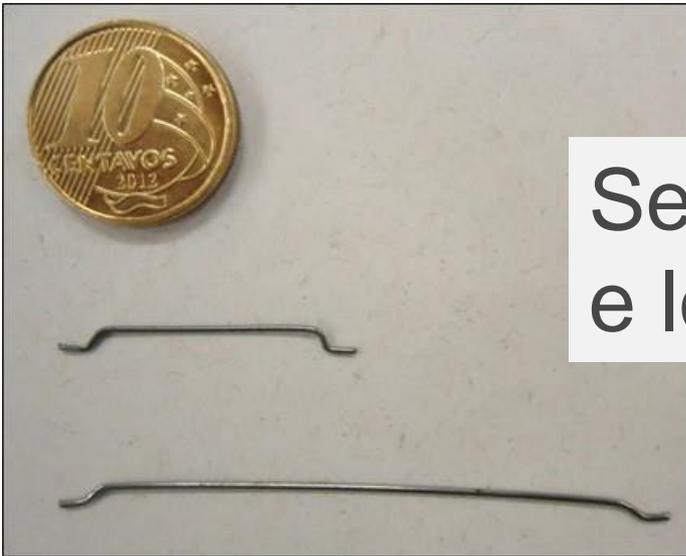


A pré-qualificação deve ser realizada pelo fabricante, segundo:

NBR 6207 : Determinação da resistência do aço para as Classes I e III.

ASTM A370 : Determinação da resistência do aço para as Classes II.

# RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DE FIBRAS DE AÇO SEGUNDO A NBR 15530:2007



Selecionadas duas fibras: curta e longa

## CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS:

Tipo A, com ancoragem nas extremidades.  
Classe I, oriunda de arame trefilado a frio.

Tipo (geometria)	Classe da fibra	Fator de Forma mínimo $\lambda$	Limite de resistência a tração do aço MPa $(*)f_u$
A	I	40	1000

## REQUISITOS GEOMETRICOS DA FIBRA:

Realizou-se a medição do diâmetro ( $d_1$  e  $d_2$ ) em duas direções ortogonais entre si, e do comprimento ( $l$ ) não alongado sem nenhuma retificação. A medição foi executada em uma amostra de *60 fibras* coletadas:



## Resultados:

### Análise dos resultados fibra curta

	D1 (mm)	D2 (mm)	De=(D1+D2)/2	30	45
				L (mm)	$\lambda=L/De$
<b>Média</b>	0.61	0.61	0.61	29.07	47.59
<b>DP</b>	0.009	0.009	0.008	0.281	0.761
<b>CV</b>	1.5%	1.4%	1.3%	1.0%	1.6%
<b>N</b>	60	60	60	60	60
<b>Máximo</b>	0.63	0.63	0.63	29.59	49.27
<b>Mínimo</b>	0.59	0.59	0.60	28.22	45.52

Tolerâncias dimensionais NBR 15530:07		
L > 10%	De > 5%	D1-D2 > 4%
0	0	0

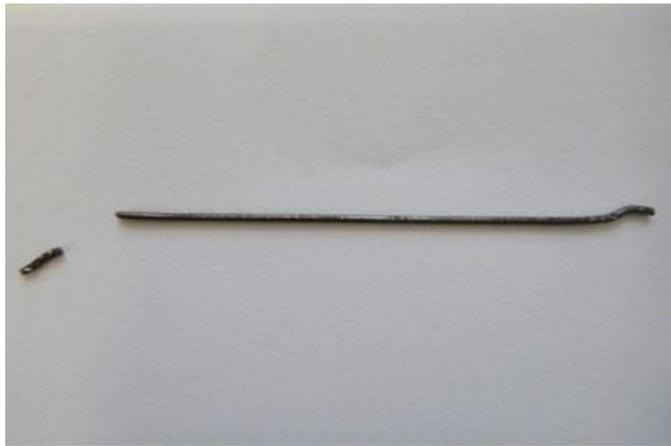
### Análise dos resultados fibra longa

	D1 (mm)	D2 (mm)	De=(D1+D2)/2	60	80
				L	$\lambda=L/De$
<b>Média</b>	0,74	0,74	0,74	60,28	81,61
<b>DP</b>	0,009	0,007	0,007	0,223	0,821
<b>CV</b>	1,2%	0,9%	0,9%	0,4%	1,0%
<b>N</b>	60	60	60	60	60
<b>Máximo</b>	0,75	0,76	0,75	60,79	84,13
<b>Mínimo</b>	0,71	0,72	0,72	59,73	79,89

Tolerâncias dimensionais NBR 15530:07		
L > 5%	De > 5%	D1-D2 > 4%
0	0	0

Os dois tipos de fibras estão de acordo com a NBR 15530:2007: FF > 40 e valores individuais medidos atendem a 100% dos requisitos.

# RESISTÊNCIA A TRAÇÃO: ensaio particularmente difícil para a fibra curta.



## Fibra longa

Corpo de Prova	Diâmetro (mm)	Carga de ruptura (Kgf)	Resistência a tração (MPa)
CP 1	0,725	48,00	1163
CP 2	0,725	52,00	1260
CP 3	0,735	52,00	1226
CP 4	0,740	46,00	1070
CP 5	0,740	51,00	1186
		<b>Média</b>	<b>1181</b>

**Tabela 6** - Resistência a tração das fibras Dramix 45/30.

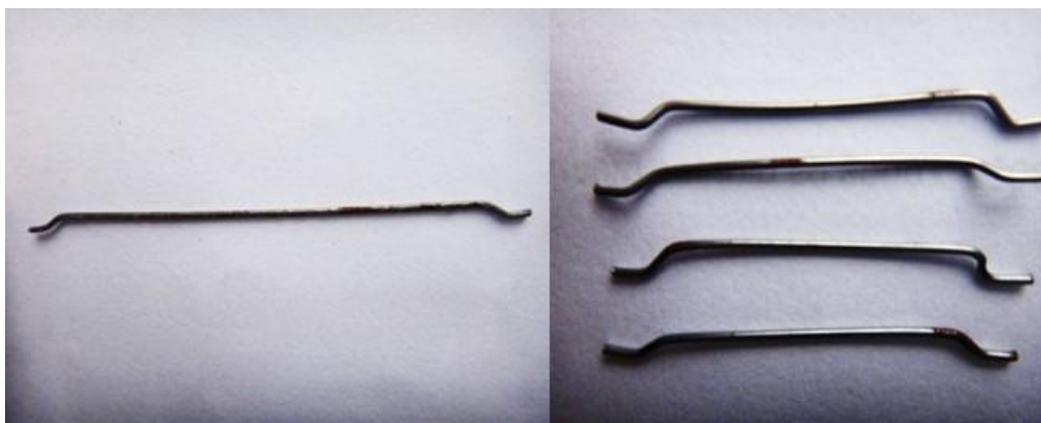
Corpo de Prova	Diâmetro (mm)	Carga de ruptura (Kgf)	Resistência a tração (MPa)
CP 1	0,615	32,00	1077
CP 2	0,600	34,00	1203
		<b>Média</b>	<b>1140</b>

Segundo NBR 15530  $f_s > 1000\text{MPa}$ : **as fibras cumprem** o mínimo estabelecido.

## RESISTENCIA AO DOBRAMENTO



## VERIFICAÇÃO DE DEFEITOS:



Detalhe das fibras oxidadas.

Com relação à resistência ao dobramento e à verificação de defeitos, de acordo a NBR 15530, todas as fibras cumprem com o estabelecido.

# **MACROFIBRAS POLIMÉRICAS**

## **SEGUNDO CT303**

- Nova recomendação CT303
- Baseada na norma EN 14889-2: Fibres for concrete - Part 2: Polymer fibres — Definitions, specifications and conformity

# Requisitos

- Gerais: tipo de polímero, forma (dimensões), tipo de agrupamento, tratamento de superfície.



(a)



(b)



(c)



(a)



(b)

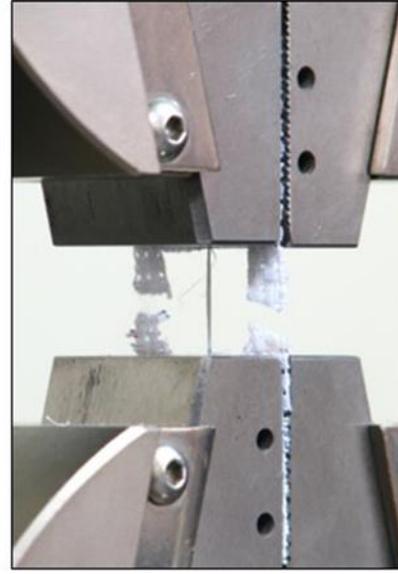
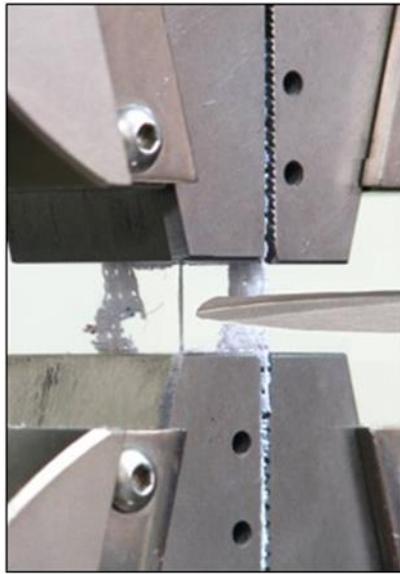
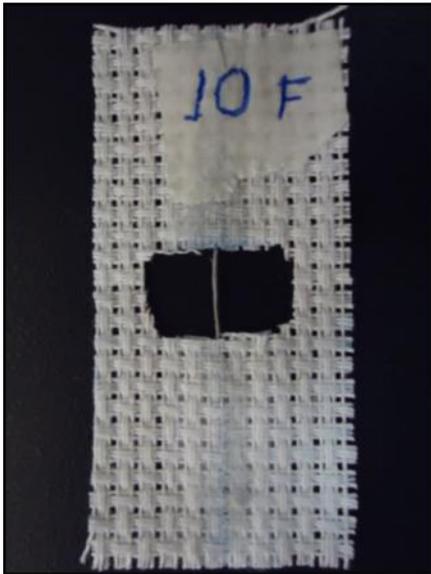
# Requisitos

- Dimensionais

Característica	Símbolo	Desvio máximo admissível do valor individual medido em relação ao valor declarado	Desvio máximo admissível do valor médio medido em relação ao valor declarado
Comprimento e comprimento desenvolvido	$L, L_d$	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$
Diâmetro equivalente	$d_e$	$\pm 50\%$	$\pm 5\%$
Fator de forma	$\lambda$	$\pm 50\%$	$\pm 5\%$

# Requisitos

- Propriedades mecânicas:
- Resistência à tração e módulo de elasticidade por norma europeia (EN 10002-1)  $R_m$  e  $E$  ou método simplificado (Anexo C)  $R_{ms}$  e  $E_s$



ESTRADA, A. R. C.; GALOBARDES, I.; FIGUEIREDO, A. D. Mechanical characterization of synthetic macrofibres. **Materials Research**. v.19, n.3, pp.711-720, 2016.

# Requisitos

- Propriedades mecânicas:
- Resistência à tração e módulo de elasticidade por norma europeia (EN 10002-1)  $R_m$  e  $E$  ou método simplificado (Anexo C)  $R_{ms}$  e  $E_s$
- Tolerâncias sobre os valores declarados:
  - $R_m$  e  $E$  é de 10% para os valores individuais e de 5% para os valores médios.
  - $R_{ms}$  e  $E_s$  é de 20% para os valores individuais e de 10% para os valores médios.

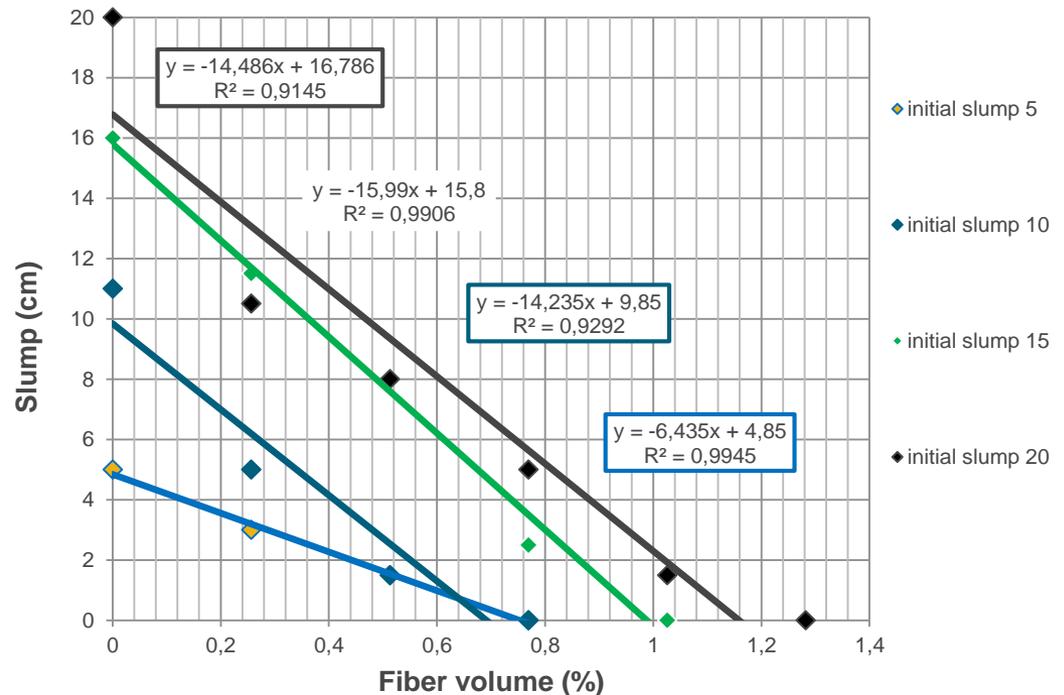
# Requisitos

## Efeito sobre a consistência do concreto

O efeito da adição das macrofibras na consistência do concreto será determinado em um concreto de referência (Anexo D).



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



# Requisitos

## Efeito sobre a resistência residual do concreto

O efeito da macrofibra sobre a resistência residual do concreto será determinada utilizando os concretos de referência.

$$f_L = (4,3 \pm 0,3) \text{ MPa}$$

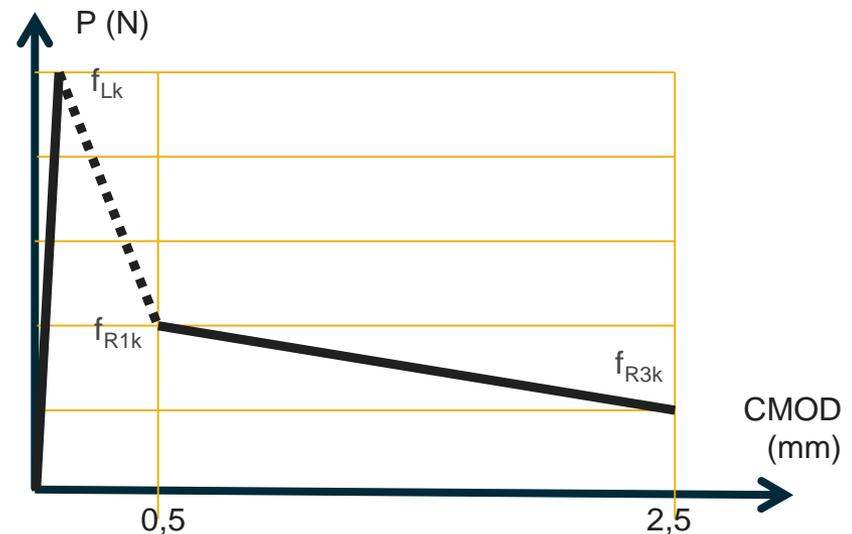
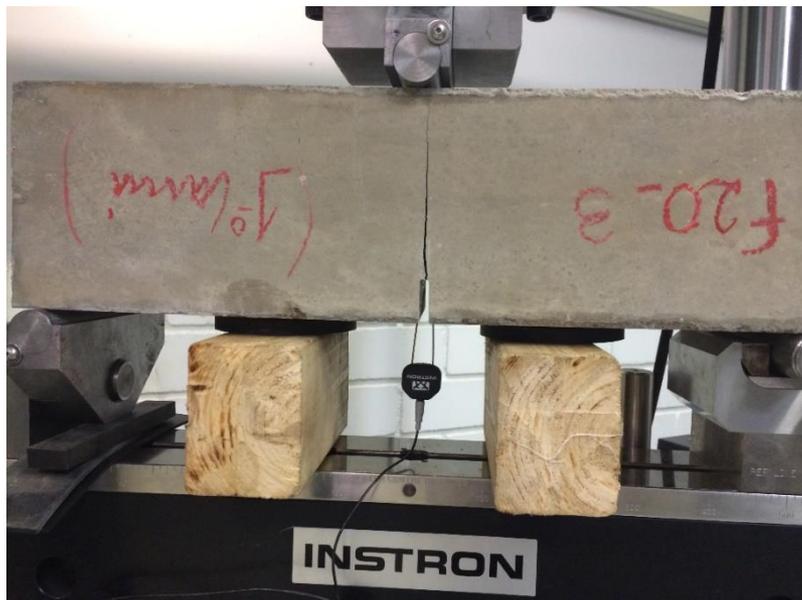
$$f_{R1m} = 1,60 \text{ MPa}$$

$$f_{R3m} = 0,80 \text{ MPa}$$

$$f_L = (5,3 \pm 0,3) \text{ MPa}$$

$$f_{R1m} = 2,00 \text{ MPa}$$

$$f_{R3m} = 1,00 \text{ MPa}$$



# Resistência ao meio alcalino das macrofibras poliméricas

- Histórico de utilização de resíduos de PET para a fabricação de fibras para o reforço do concreto.
- É uma ideia interessante aproveitar resíduos, mas isto não pode comprometer a tecnologia.
- Objetivo: Avaliação de desempenho quanto à estabilidade em meio alcalino.
- Método especificado na recomendação prática (Anexo A)

# **MACROFIBRAS DE VIDRO SEGUNDO CT303**

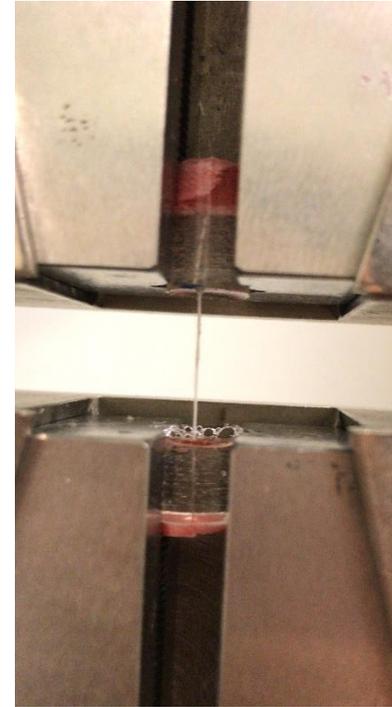
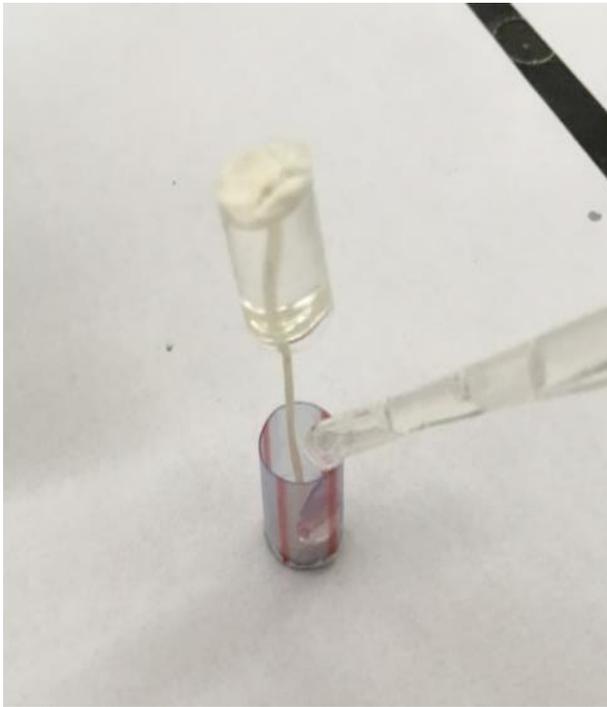
- Nova recomendação CT303
- Baseada na norma UNE83516
  - Fibras para hormigón
  - Fibras de vidro resistentes a los álcalis (AR)

# Fibras de vidro para aplicações estruturais

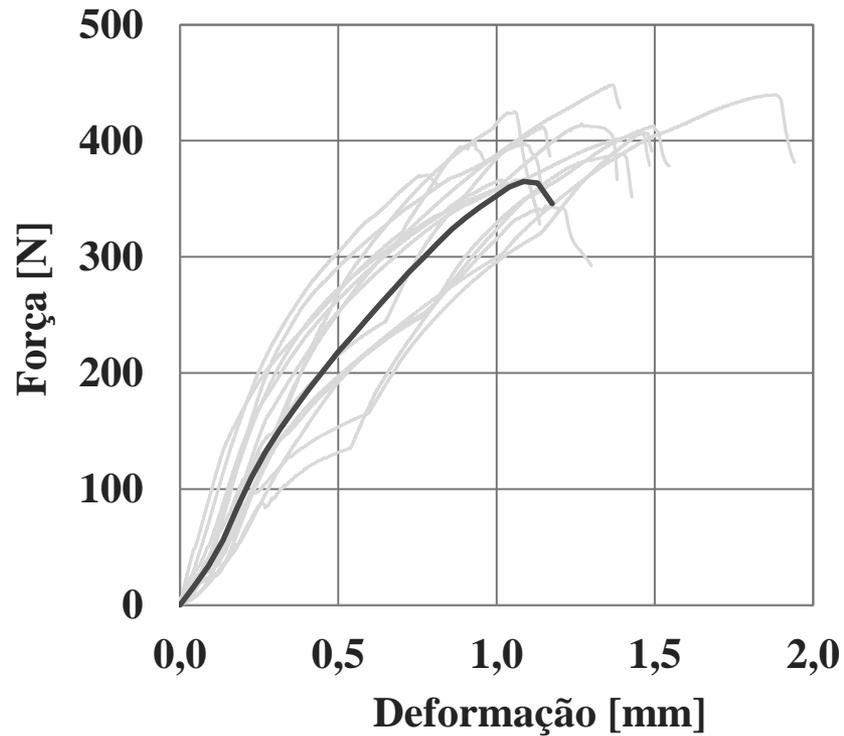
- Exigências muito similares às das macrofibras poliméricas:
  - Tolerâncias dimensionais
  - Densidade linear (Norma EN 15422)
  - Resistência à tração e módulo de elasticidade
  - Efeito na trabalhabilidade e resistência residual
  - **Resistência ao meio alcalino** (Norma EN 14649)
  - A norma europeia (EN 15422, 2008) indica que para uma fibra de vidro ser considerada álcali resistente é necessário a presença de no mínimo 16% de dióxido de zircônio ( $ZrO_2$ )

# Propriedades mecânicas

- Avaliação da tração diretamente na macrofibra de vidro



# Propriedades mecânicas



**Mais detalhes na defesa de mestrado**

**Joelma Manzione**

**24/10/2019 as 9h**

**Sala de videoconferencia**

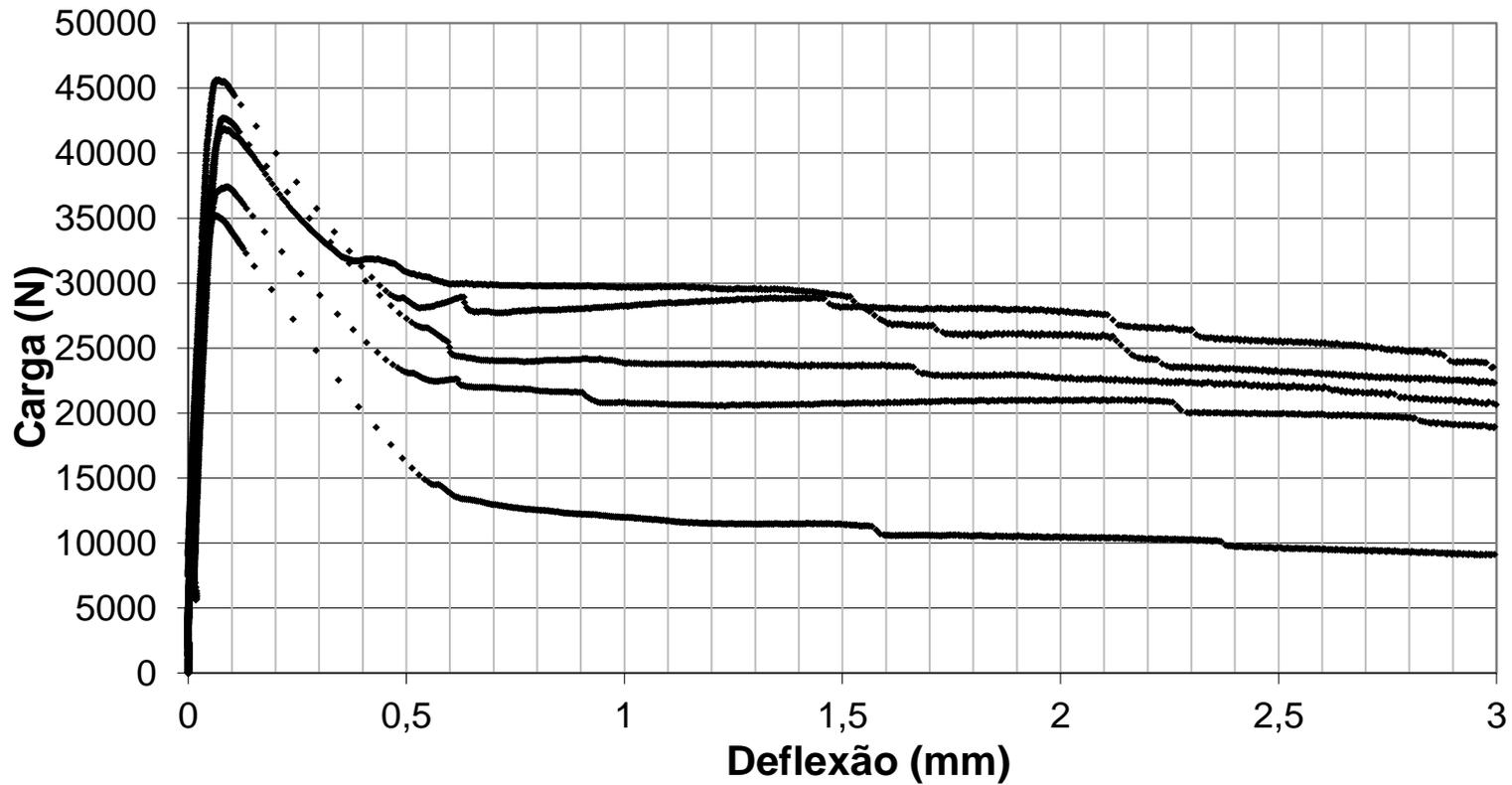
# Comentários

- Caminhamos para a futura normalização:
  - É necessário aplicar essas normas
- Podemos chegar a ter fibras com certificado de qualidade no mercado
- Evitar “leilão não tecnológico”

# Dúvidas cruéis...

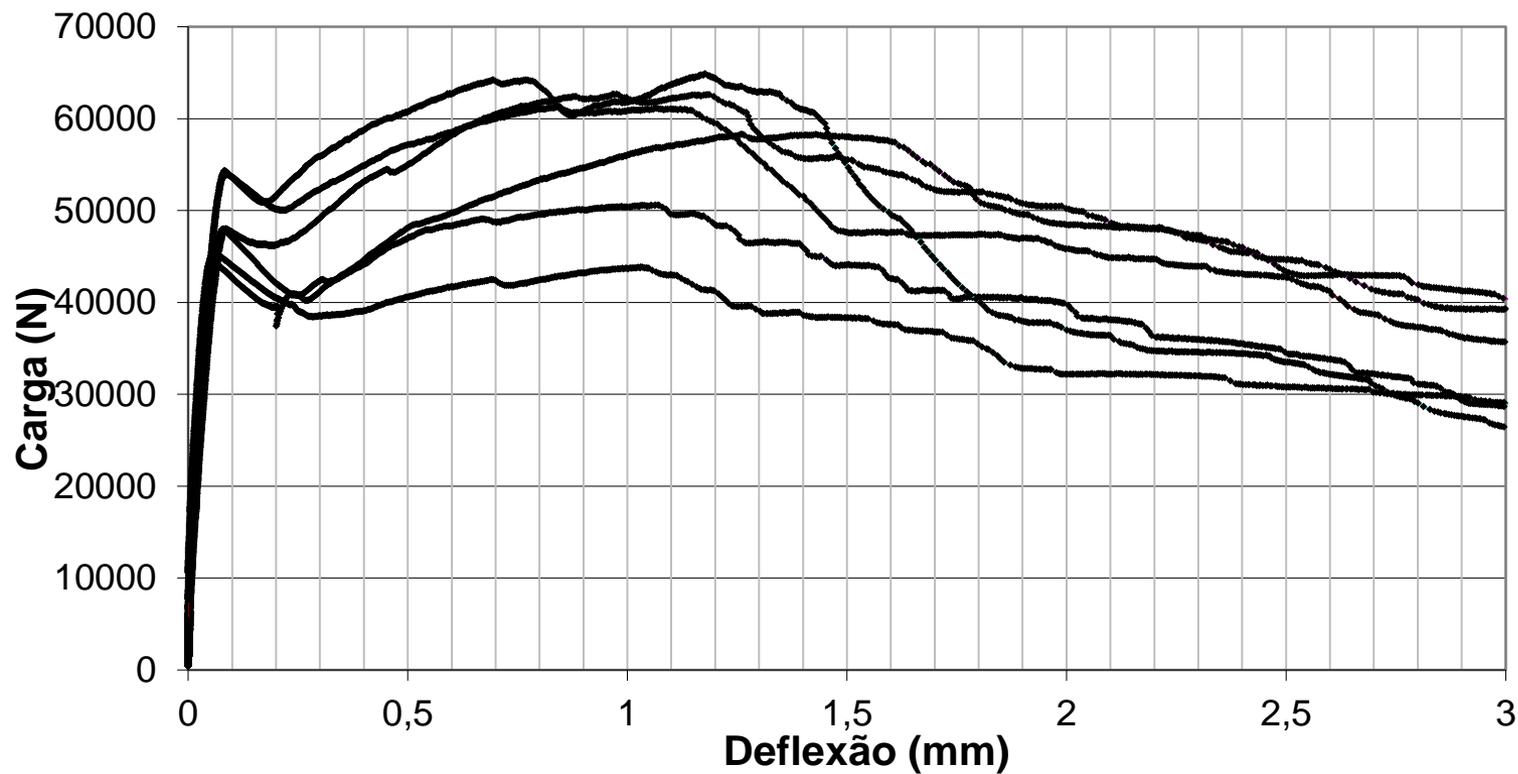
- O controle e a dosagem deve ser feito a partir dos valores característicos de resistência residual?
- Qual é o erro admissível para estrutura e para os corpos de prova?
- Como avaliar a condição de segurança de uma estrutura de CRF?

# Exemplo de dosagem



$f_{ck} = 35 \text{ MPa}$  com  $15 \text{ kg/m}^3$  de fibra de aço

# Exemplo de dosagem



$f_{ck} = 35 \text{ MPa}$  com  $45 \text{ kg/m}^3$  de fibra de aço

# Exemplo de dosagem $f_{0,5}$

Valor	45 0,5mm	45 3mm	15 0,5mm	15 3mm
Média =	6,82	4,26	3,37	2,53
Desvio =	1,00	0,71	0,81	0,77
CV =	14,62	16,60	23,92	30,32
$f_{0,5k}$ =	5,17	3,09	2,04	1,26

Solução encontrada:

$$f_{rk} = 0,7 \cdot f_{rm}$$

# Por que 5% para o quantil?



[http://obviousmag.org/archives/2005/07/manter\\_a\\_forma\\_1.html](http://obviousmag.org/archives/2005/07/manter_a_forma_1.html)



**É razoável pedir 5% de quantil para um túnel?  
O professor Fusco disse que não.**

# E um pavimento industrial?

- Já nasceu caído.
- Os esforços podem ser bem localizados e controlados (condição de uso mais controlada).
- O comprometimento de uma parte da estrutura (ruptura localizada do pavimento) não afeta necessariamente a estabilidade do restante.

# Comentários finais

- Aplicações com alto grau de empirismo acarretam sistemas em risco (não otimizado ou inseguros).
- Modelos de dimensionamento e previsão de comportamento (Bittencourt Jr., ) são fundamentais.
- A visão integrada é fundamental para a garantia do bom desempenho das obras de infraestrutura: vocação natural do CRF.
- **Há muito que se investir em infraestrutura no Brasil e há muito que investir em pesquisa.**