



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

Programa de Pós-Graduação  
**ENGENHARIA CIVIL**



**POLITÉCNICA**  
ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

---

# **TUBOS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS**

Renata Monte

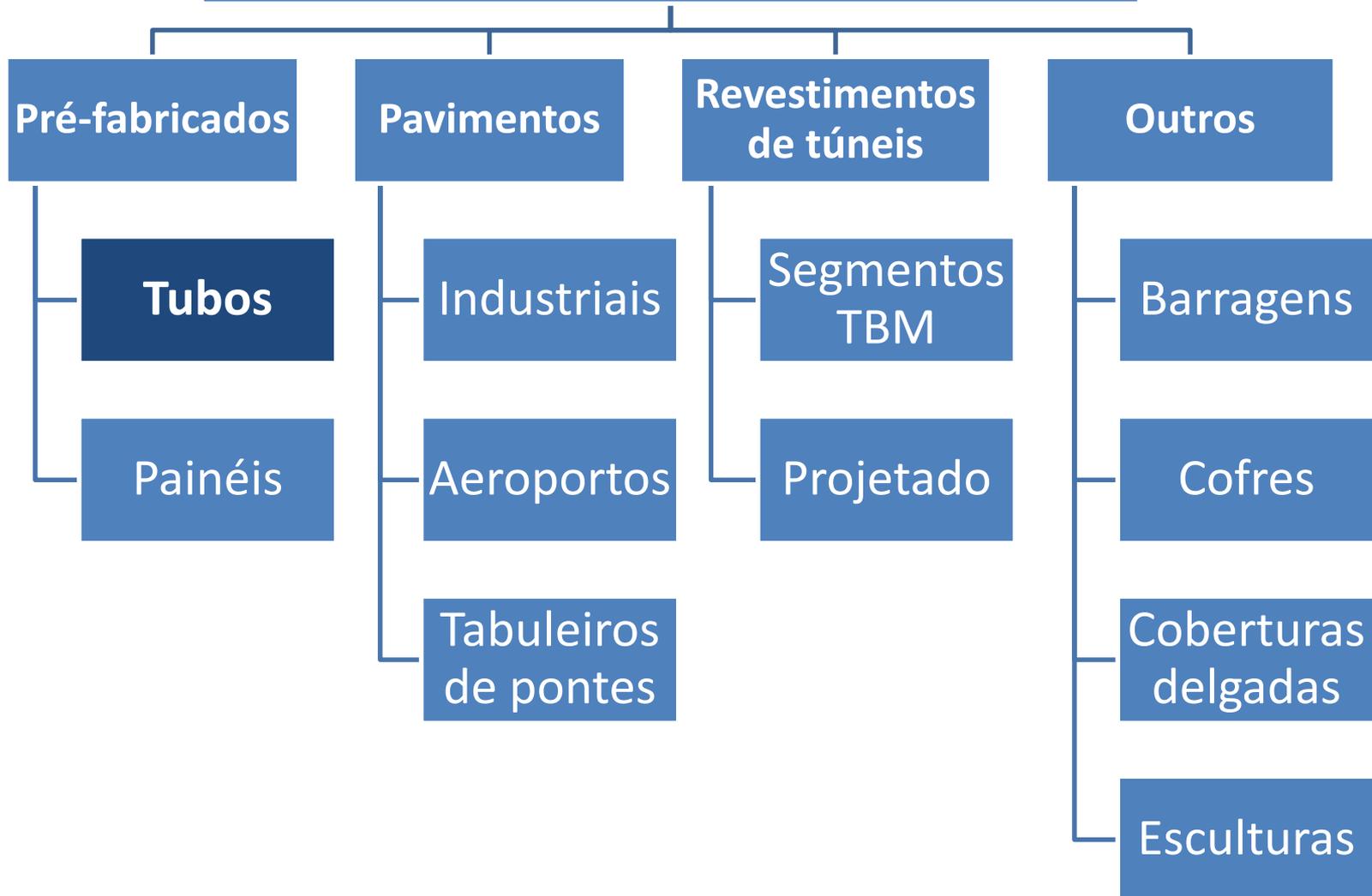
Antonio Domingues de Figueiredo

---

# Contextualização

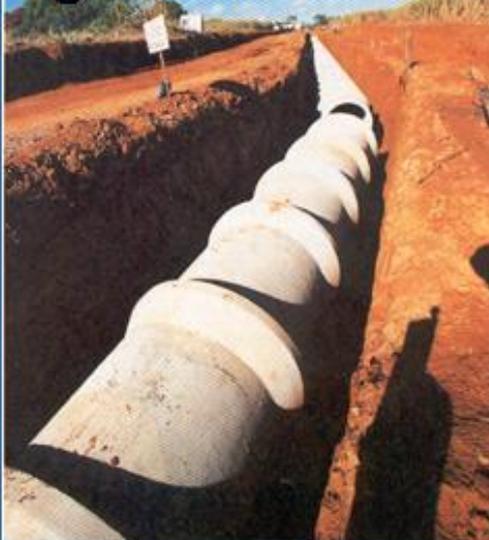
- ✓ A evolução do CRF no Brasil está bem atrasada
- ✓ Na Europa já há aplicações em **lajes de edifícios** unicamente reforçadas com fibras (DESTRÉE, 2009)
- ✓ No Brasil ainda **não há normas de projeto estrutural e controle tecnológico** focando o CRF
- ✓ Horizonte promissor: **Novo Código Modelo *fib*** e documentos produzidos pelo CT303 IBRACON/ABECE

# Principais aplicações do CRF



# Principais Aplicações

**Águas Pluviais**



**Galerias e Bueiros**

**Abastecimento**



**Esgoto Sanitário**



**Drenagem**



# Demanda social

- ✓ Níveis baixos de atendimento à coleta de esgoto no Brasil levantado pelo Ministério das Cidades.
- ✓ **Inferiores a 50%** na maioria das regiões!

<i>Regiões</i>	<i>Índice de atendimento (%)</i>				<i>Índice de tratamento dos esgotos (%)</i>	
	<i>Água</i>		<i>Coleta de esgotos</i>		<i>Esgotos gerados</i>	<i>Esgotos coletados</i>
	<i>Total</i>	<i>Urbano</i>	<i>Total</i>	<i>Urbano</i>	<i>Total</i>	<i>Total</i>
Norte	52,4	62,4	6,5	8,2	14,7	85,3
Nordeste	72,1	89,8	22,1	29,3	28,8	78,1
Sudeste	91,7	96,8	77,3	82,2	43,9	64,3
Sul	87,4	97,4	38,0	44,2	35,1	78,9
Centro-oeste	88,2	96,3	42,2	48,6	45,9	91,6
Brasil	82,5	93,0	48,6	56,3	39,0	69,4

(SNIS, 2014)

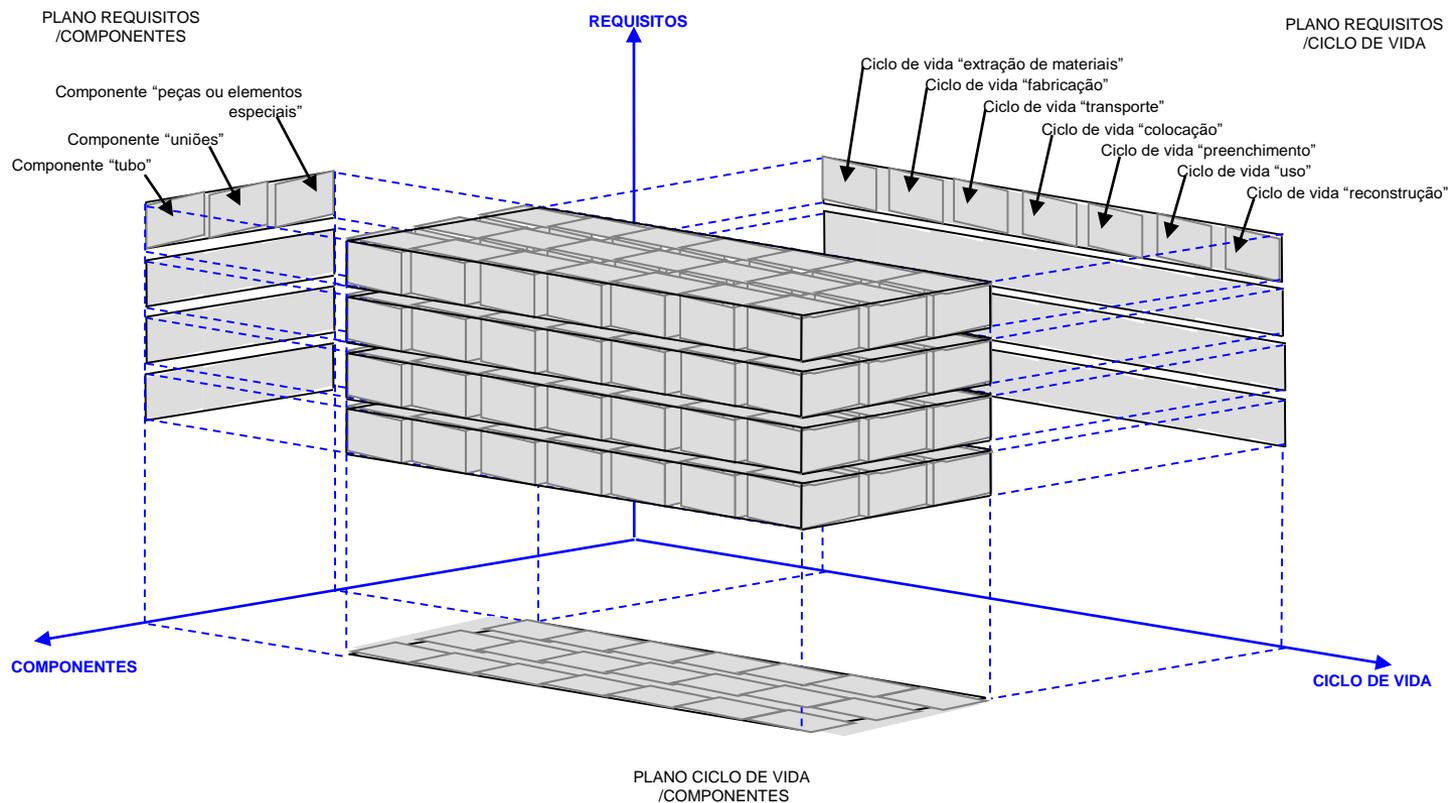
# Demanda social

- ✓ Muito pouco avançou nos últimos 5 anos (2008-2013).
- ✓ Maior crescimento na região menos crítica.

<i>Regiões</i>	<i>Índice de atendimento (%)</i>				<i>Índice de tratamento dos esgotos (%)</i>
	<i>Água</i>		<i>Coleta de esgotos</i>		<i>Esgotos gerados</i>
	<i>Total</i>	<i>Urbano</i>	<i>Total</i>	<i>Urbano</i>	<i>Total</i>
Norte	-5,2	-9,6	0,9	1,2	3,5
Nordeste	4,1	0,4	3,2	3,7	-5,7
Sudeste	1,4	-0,8	10,7	10,1	7,8
Sul	0,7	-0,8	5,6	5,9	4,0
Centro-oeste	-1,3	0,7	-2,6	-0,9	4,3
Brasil	1,3	-1,7	5,4	5,7	4,4

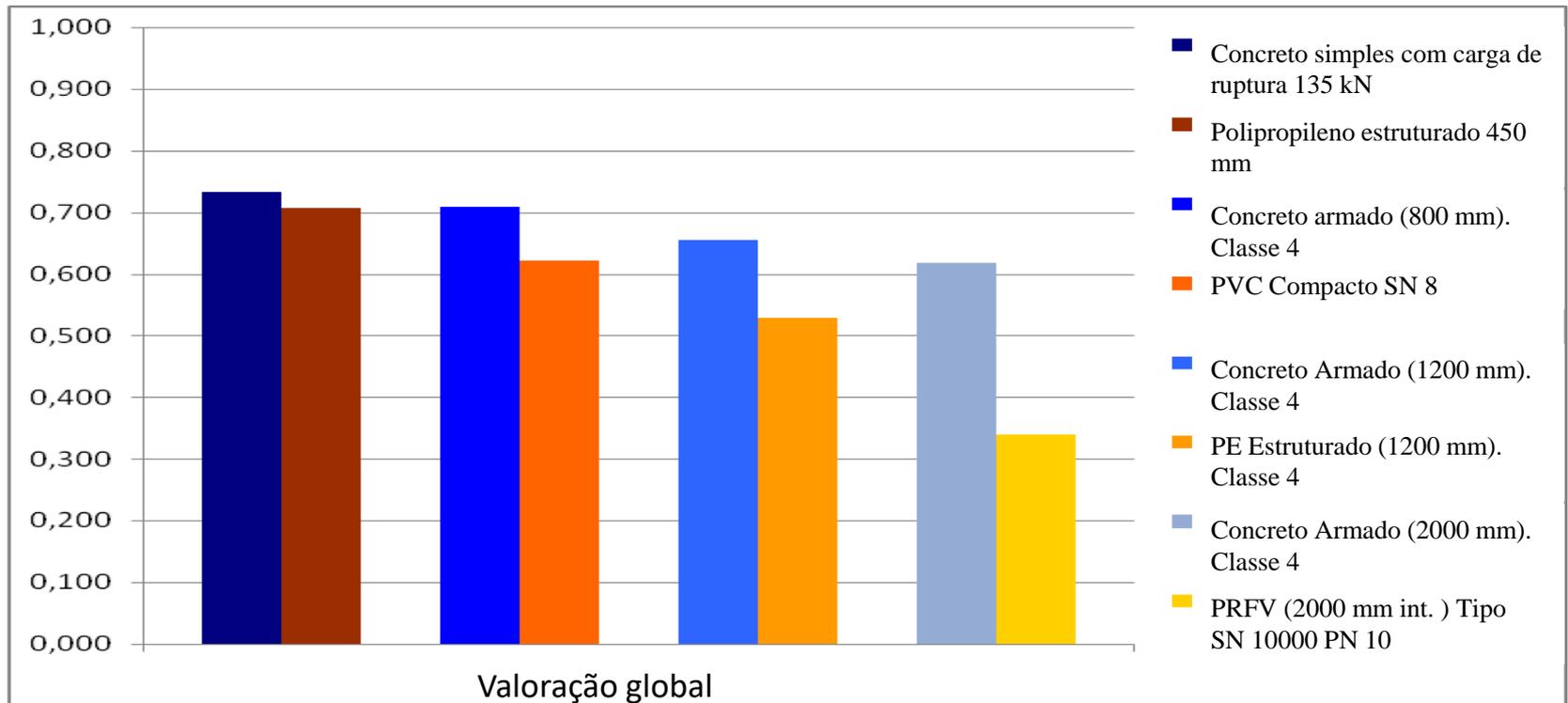
# Tubos de concreto: Aplicação sustentável em obras de saneamento

Tubos de concreto são mais sustentáveis (VIÑOLAS; AGUADO; ROSÁ, 2009)



# Tubos de concreto: Aplicação sustentável em obras de saneamento

**Tubos de concreto são mais sustentáveis (VIÑOLAS; AGUADO; ROSÁ, 2009)**



# Produção dos tubos

- Tubos são componentes pré-moldados de concreto, controlados como produto acabado.
- Pode possuir marca de conformidade ou certificado de conformidade de terceira parte.
- **Preocupação dos produtores:** dosagem e controle de produção.
- **Preocupação dos consumidores:** controle de recebimento (ACEITAÇÃO OU REJEIÇÃO).

# Produção de tubos: concreto



Silos fechados de agregados para controle rigoroso da umidade

Silo de cimento

Misturador central



# Produção de tubos: concreto

Silo de alimentação  
do equipamento de  
moldagem



# Produção de tubos: armadura



# Produção de tubos: armadura



# Produção de tubos: concreto



# Produção de tubos: equipamentos



Vibro-  
prensado



Radial

# Produção de tubos: fôrma removível



Anel de base permanece  
após desfôrma

# Produção de tubos: moldagem



Alimentação  
com vibração  
simultânea

Acabamento  
de topo com  
prensagem



# Produção de tubos: remoção



Remoção da  
fôrma do  
equipamento  
de moldagem

Posicionamento  
da fôrma no local  
de desfôrma



# Produção de tubos: desfôrma



# Produção de tubos: “cura” e estocagem



# Vantagens dos TCRF

- ✓ Facilidade de produção -> elimina-se a preparação da armadura, pois as fibras são adicionadas diretamente
- ✓ Aceleração do processo produtivo
  - Maior produtividade
  - Menor gasto de energia
  - Menor desgaste do equipamento



# Vantagens dos TCRF

- ✓ Distribuição aleatória das fibras por todo o volume do componente -> **reforço nas bordas e menor risco de quebra**
- ✓ Maior capacidade de **reforço para baixos níveis de deformação e fissuração** -> fibra reforça toda a espessura do tubo
- ✓ Norma brasileira de TCRF -> **primeira norma nacional** que parametriza o uso de fibras de aço

# Avaliação do uso de fibras para redução de perdas

- Feita com a simples adição de fibras num lote de tubos de concreto para águas pluviais, classe PS1
- Utilizou-se fibras de aço RC 80/60
- Foram moldados 150 tubos de  $\phi$  600 mm, classe PS1, com 5 kg/m<sup>3</sup> de fibra RC 80/60 e 50 tubos com 10 kg/m<sup>3</sup>.

# Avaliação do uso de fibras para redução de perdas

- Os tubos foram enviados à obras correntes e acompanhou-se a ocorrência de perdas por quebra e rejeição por fissuração ou qualquer outro dano: Não houve perdas (normal 5%).
- Apesar da baixa amostragem, é seguro afirmar que a utilização de baixos teores de fibras (mesmo para  $5 \text{ kg/m}^3$ ) reduz as perdas.

# Desvantagens aplicativas do uso das fibras em tubos de concreto

- Aumento das atividades de acabamento



- Maior dificuldade para “reciclar” o concreto dos tubos.
- Necessidade de ajustes nos equipamentos e na mistura (demanda de **trabalhabilidade**).
- Menor capacidade de reforço para altos níveis de deformação e fissuração -> teores abaixo volume crítico

# 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)

# Dificuldade: dimensionamento do TCRF

- ✓ Baseado na **tentativa e erro** através do ensaio de compressão diametral
  - **antieconômico**
  - **resíduo** de concreto (tubos rompidos)
- ✓ Variados tipos e teores de fibra
- ✓ Carência de modelos para otimizar a dosagem e o desempenho do componente

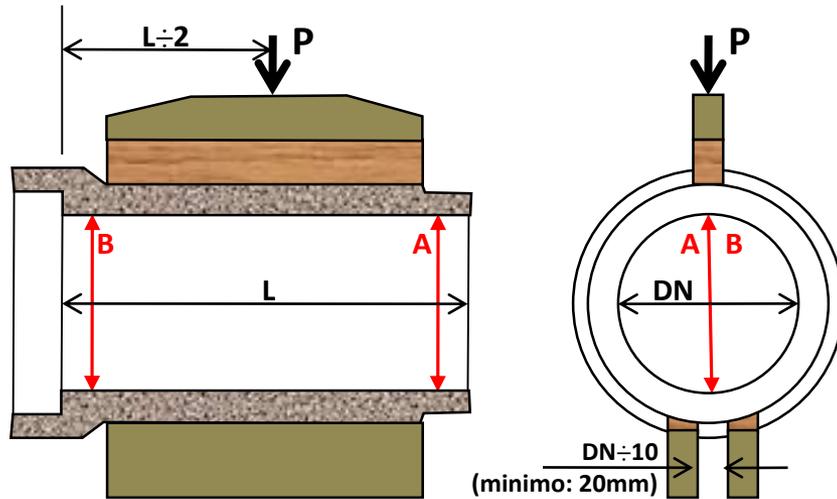
# Alternativa: modelo MAP

- ✓ Desenvolvido na UPC (de la FUENTE, 2011)
- ✓ Possibilita produzir **ábacos para projeto de TCRF** com diferentes tipos de fibras
- ✓ Necessita de parâmetros básicos do comportamento à tração do CRF
  - Atualmente através de ensaios de tração na flexão
  - Moldagem de prismas que representem o material do tubo não é uma tarefa simples (CHAMA NETO, 2002 E FUGII,2008)

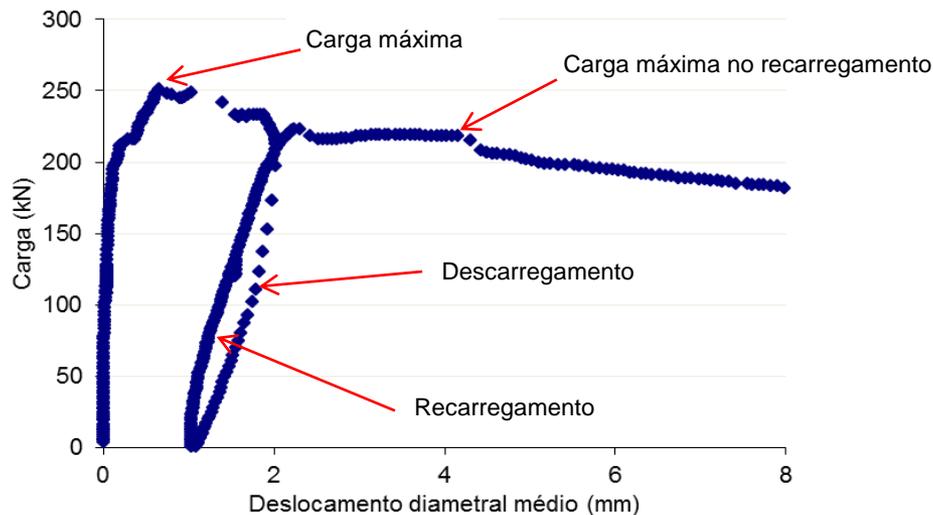
# Comportamento mecânico dos TCRF

- ✓ NBR 8890 (2007) **permite o uso de fibras de aço** como reforço do concreto.
- ✓ Tubos com fibras de aço **são considerados como tubos armados**, mas devem ser **identificados** como reforçados com fibras e **receber qualificação específica**.
- ✓ Controle dos tubos envolve : tolerâncias dimensionais, defeitos, estanqueidade e **capacidade resistente** .

# Ensaio de compressão diametral – NBR 8890



- ✓ Carregamento contínuo para tubos de concreto simples ou armados
- ✓ Carregamento cíclico para TCRF (sem LVDT)
- ✓ Requisitos



- ✓ Carga fissura ( $w = 0,25\text{mm}$ ) e carga de ruptura (armados)
- ✓ Carga mínima isenta de dano e carga de ruptura ou máxima (TCRF)

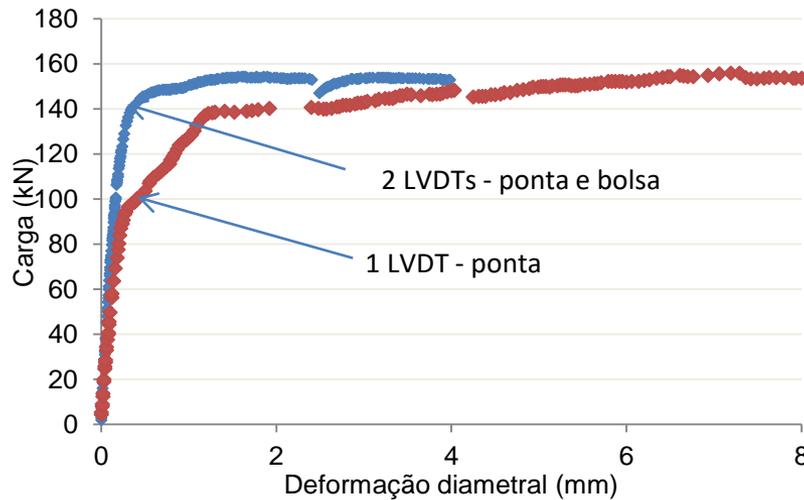
# Classes de Tubo - ABNT NBR 8890/2007

<b>RESISTÊNCIA DOS TUBOS DE CONCRETO PARA ESGOTO SANITÁRIO</b>						
<b>DIÂMETRO NOMINAL (MM)</b>	<b>CARGAS MÍNIMAS DE FISSURA (kN/m)</b>			<b>CARGAS MÍNIMAS DE RUPTURA (kN/m)</b>		
	<b>EA2</b>	<b>EA3</b>	<b>EA4</b>	<b>EA2</b>	<b>EA3</b>	<b>EA4</b>
300	<b>18</b>	<b>27</b>	<b>36</b>	<b>27</b>	<b>41</b>	<b>54</b>
400	<b>24</b>	<b>36</b>	<b>48</b>	<b>36</b>	<b>54</b>	<b>72</b>
500	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>45</b>	<b>68</b>	<b>90</b>
600	<b>36</b>	<b>54</b>	<b>72</b>	<b>54</b>	<b>81</b>	<b>108</b>
700	<b>42</b>	<b>63</b>	<b>84</b>	<b>63</b>	<b>95</b>	<b>126</b>
800	<b>48</b>	<b>72</b>	<b>96</b>	<b>72</b>	<b>108</b>	<b>144</b>
900	<b>54</b>	<b>81</b>	<b>108</b>	<b>81</b>	<b>122</b>	<b>162</b>
1000	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>90</b>	<b>135</b>	<b>180</b>
1100	<b>66</b>	<b>99</b>	<b>132</b>	<b>99</b>	<b>149</b>	<b>198</b>
1200	<b>72</b>	<b>108</b>	<b>144</b>	<b>108</b>	<b>162</b>	<b>216</b>
1500	<b>90</b>	<b>135</b>	<b>180</b>	<b>135</b>	<b>203</b>	<b>270</b>
1750	<b>105</b>	<b>158</b>	<b>210</b>	<b>158</b>	<b>237</b>	<b>315</b>
2000	<b>120</b>	<b>180</b>	<b>240</b>	<b>180</b>	<b>270</b>	<b>360</b>

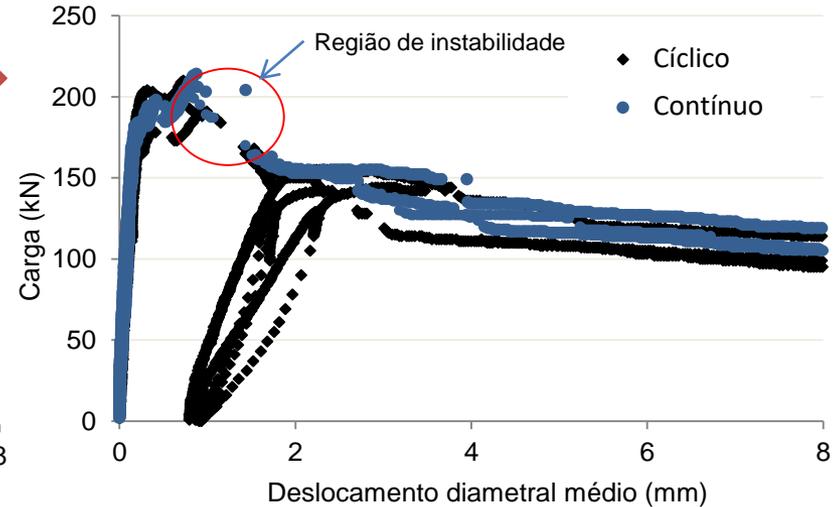
# Ensaio de compressão diametral TCRF



- ✓ Primeiras pesquisas utilizavam 2 LVDTs
  - Maior rigidez devido a bolsa
- ✓ Carregamento cíclico x contínuo
  - Comportamento da curva não alterado



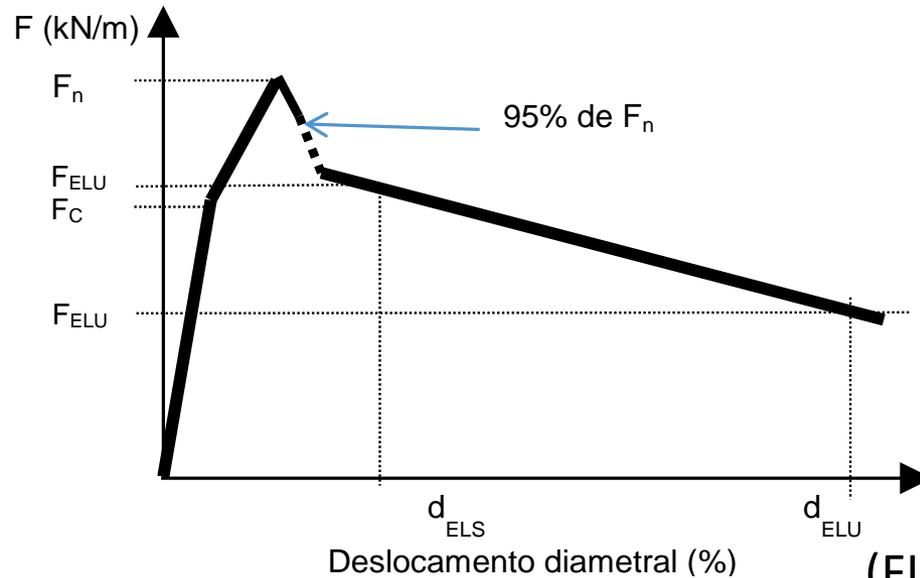
Figueiredo et al. (2012)



Figueiredo (2008)

# Ensaio de compressão diametral TCRF

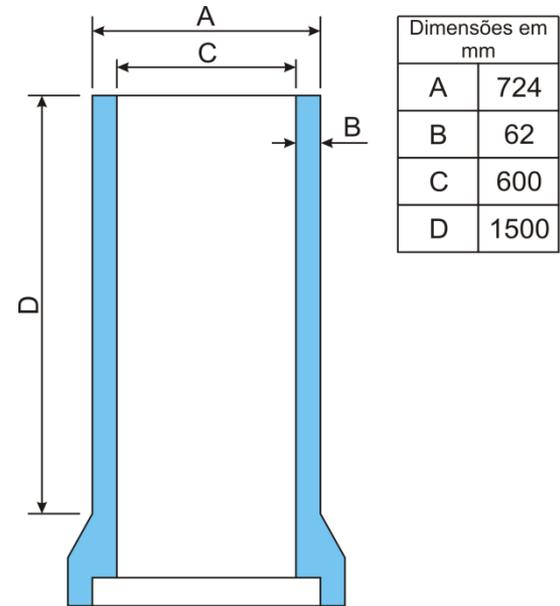
- ✓ Proposta de controle de tubos para aproximar a filosofia do *fib* Model Code
- ✓ Melhorar a confiabilidade do ensaio e solucionar problemas como:
  - Não controlar resistência pós-fissuração no ELU e ELS
  - Exigência mais severa para as fibras (ausência de fissuras)



(FIGUEIREDO et al., 2012)

# Programa experimental

- ✓ Tubos de concreto PA1-600
- ✓ Produzidos por compressão radial
- ✓ Reforçados com tela metálica
- ✓ Reforçados com fibras
  - Aço – 10 e 20 kg/m<sup>3</sup>
  - Polipropileno – 2,3 e 4,6 kg/m<sup>3</sup>



# Programa experimental

- ✓ Na fábrica foram moldados corpos de prova cilíndricos de 15x30 cm
  - caracterização física (absorção e porosidade total)
  - mecânica (resistência à compressão e **comportamento pós-fissuração ensaio Barcelona**)
- ✓ Moldagem sobre mesa vibratória
  - 3 camadas
  - 50 golpes em cada camada



# Métodos de ensaio



ECD – Contínuo, 1 LVDT ponta

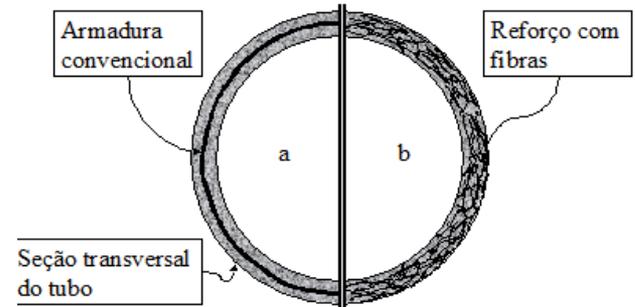
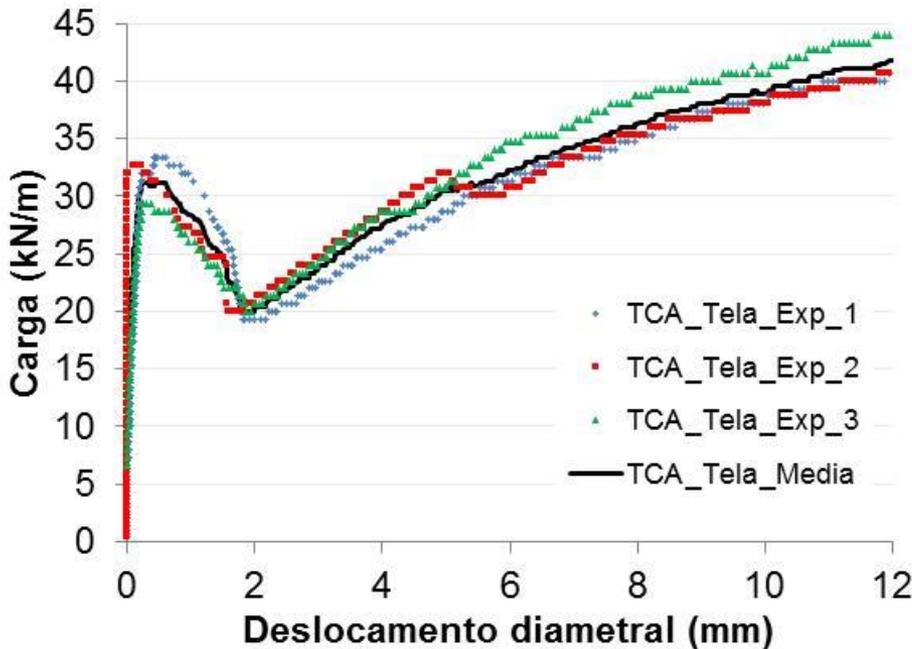


Acompanhamento da abertura de fissura



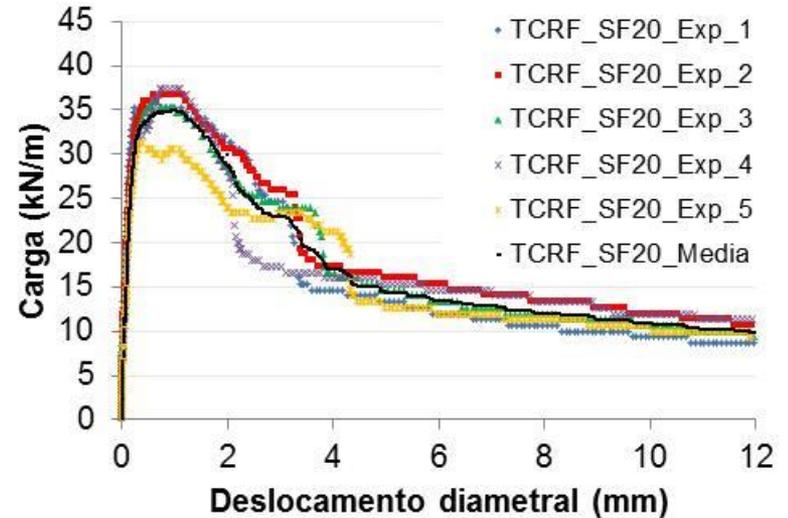
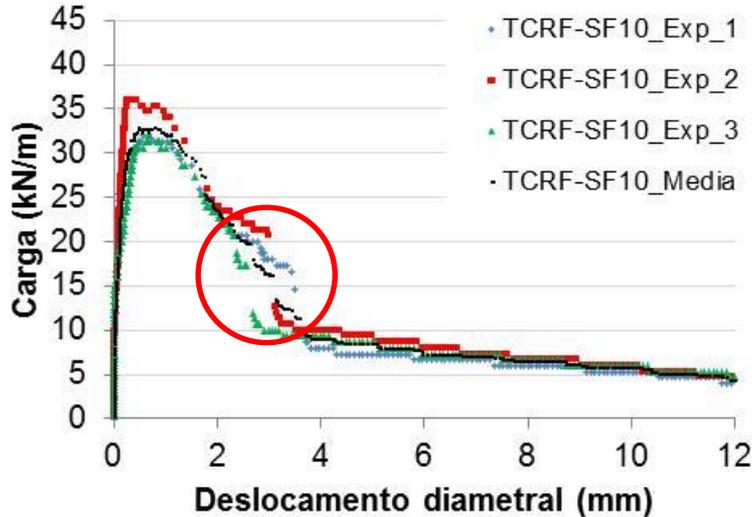
Extração testemunhos tubos ensaiados

# Compressão diametral dos tubos com tela



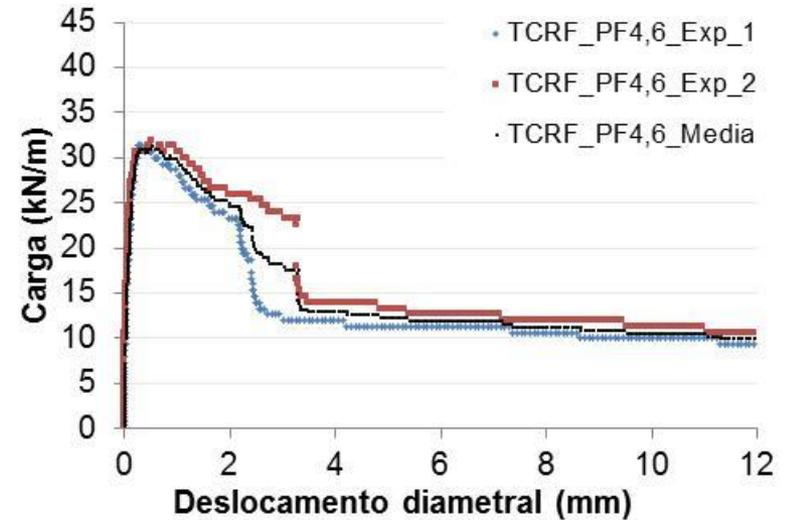
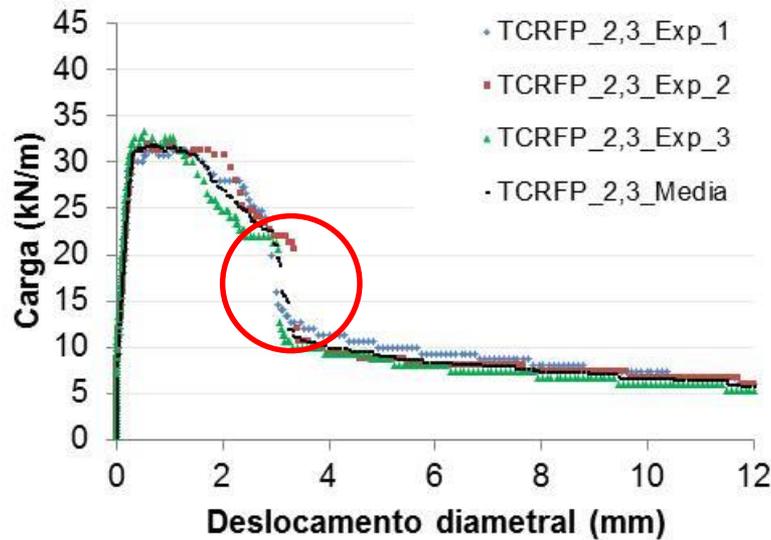
- ✓ **Redução na capacidade resistente após a carga de pico** até aproximadamente 2 mm de deslocamento diametral.
- ✓ Posicionamento da **tela no centro da espessura do tubo**, necessitando de certa **abertura de fissura** até que a armadura seja solicitada

# Compressão diametral dos TCRF



- ✓ **Instabilidade** do ensaio -> afastamento dos pontos
- ✓ **Aumento no teor** de fibra -> **redução da instabilidade**
- ✓ Maior capacidade resistente dos TCRFA para menores deslocamentos. Ex: 2 mm
  - TCA-tela = 20 kN/m
  - TCRF-SF10 = 23 kN/m
  - TCRF-SF20 = 29 kN/m

# Compressão diametral dos TCRF



- ✓ **Aumento no teor de fibra -> redução da instabilidade**
- ✓ **Maior capacidade resistente dos TCRF para menores deslocamentos. Ex: 2 mm**
  - TCA-tela = 20 kN/m
  - TCRF-SF10 = 23 kN/m TCRF\_PF2,3 = 27 kN/m
  - TCRF-SF20 = 29 kN/m TCRF\_PF4,6 = 25 kN/m

# Deslocamento diametral para a carga de fissura ( $v_{cr}$ )

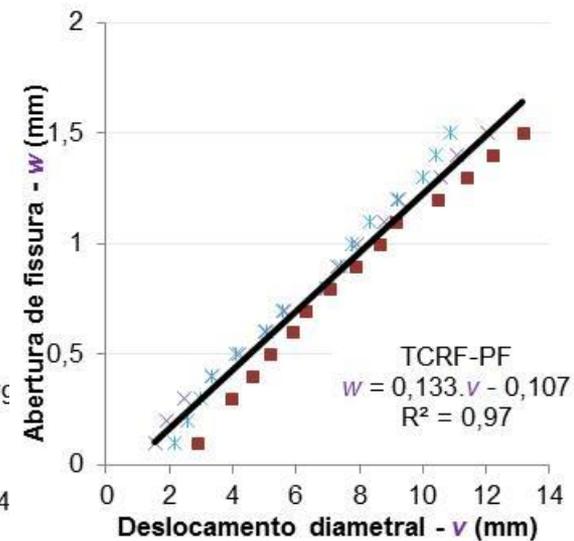
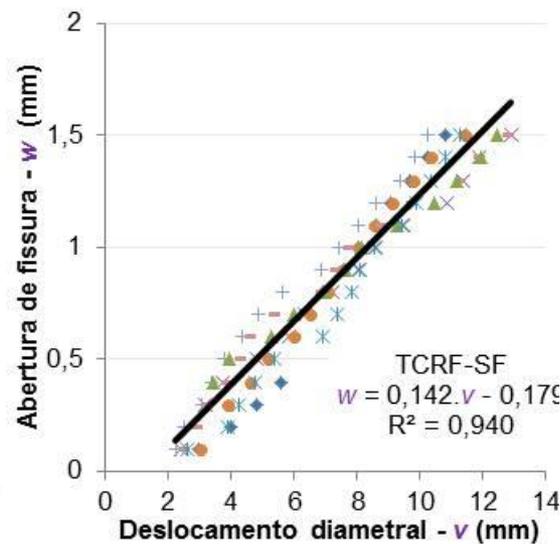
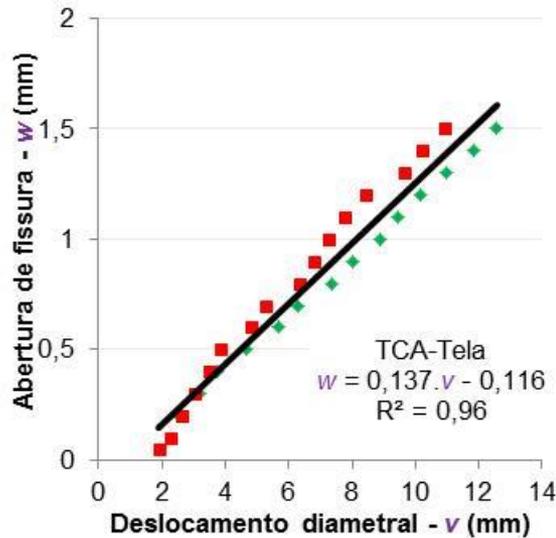
$$v_{cr} = \frac{\pi^2 - 8}{32\pi} \cdot \frac{F_{cr}(D_i + h)^3}{E_{cm}I}$$

Calculados analiticamente através do teorema de Castigliano

Tipo de reforço	Deslocamento diametral - $v_{cr}$ (mm)		$\xi$ (%)
	Analítico	Experimental (DP)	
Tela	0,28	0,21 (0,05)	-33
SF-10	0,26	0,21 (0,09)	-24
SF-20	0,29	0,24 (0,08)	-21
PF-2,3	0,27	0,25 (0,04)	-8
PF-4,6	0,27	0,17 (0,01)	-59

- ✓ Contribuição das fibras antes da fissuração não é significativo
- ✓ **Resultados próximos**, analítica ou experimentalmente
- ✓ **Dependem**, além das características **geométricas dos tubos**, da **resistência mecânica e rigidez da matriz**, que são semelhantes

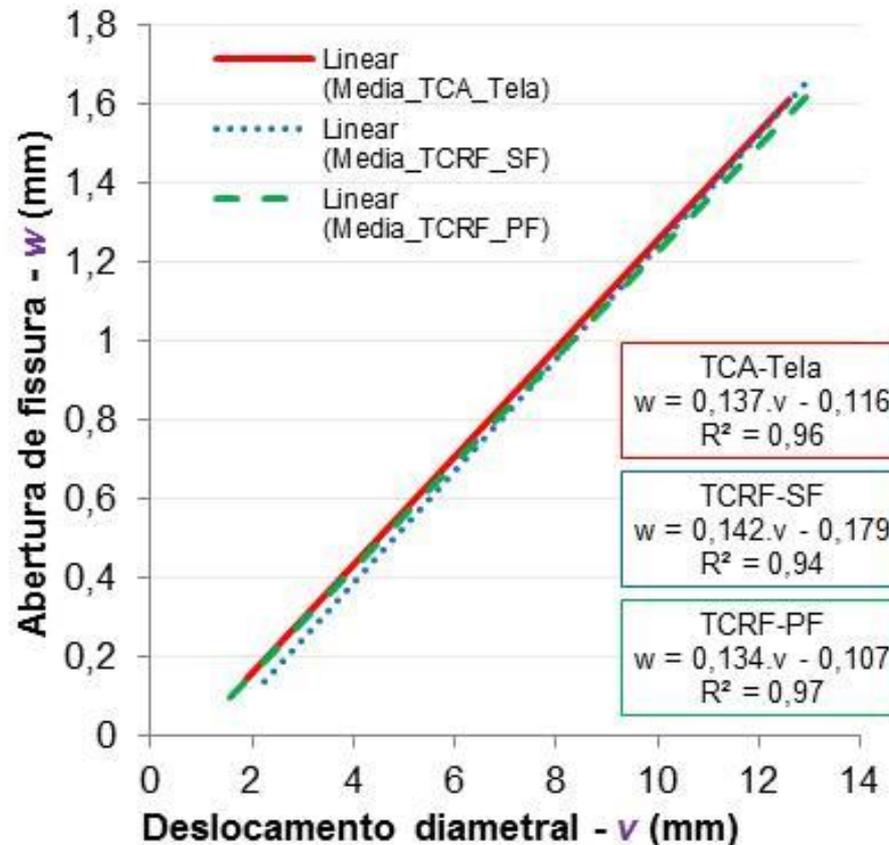
# Correlação entre o deslocamento diametral e a abertura de fissura



- ✓ Regressão linear com  $R^2$  superiores a 0,94
- ✓ Predição de valores para as aberturas de fissura correspondentes
  - Estado limite de serviço ( $d_{ELS}$ )
  - Estado limite de último ( $d_{ELU}$ )

# Correlação entre o deslocamento diametral e a abertura de fissura

- ✓ Não foi influenciada pelo tipo de reforço
- ✓ Influencia é na **capacidade resistente de cada reforço** para determinada abertura de fissura



# Correlação entre o deslocamento diametral e a abertura de fissura

$$d_{ELS} = 2,4 \text{ mm (0,4\%)}$$

$$d_{ELU} = 12 \text{ mm (2\%)}$$

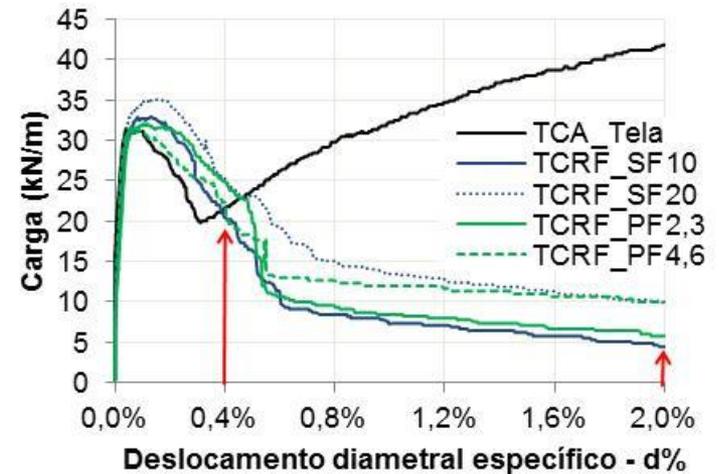
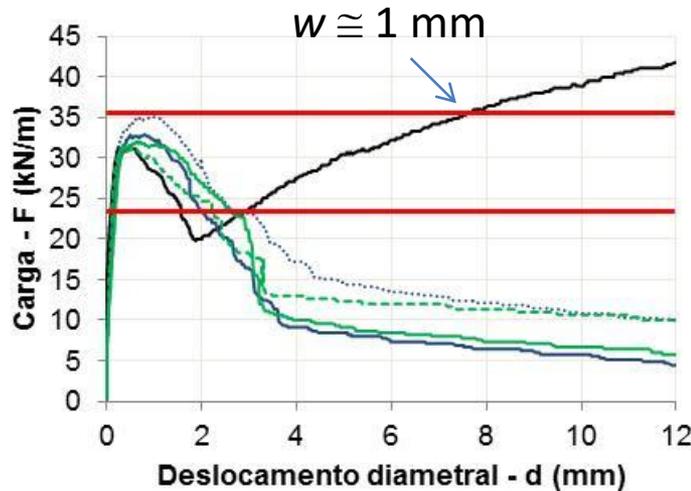
(FIGUEIREDO et al., 2012)

<i>Tipo de reforço</i>	<i>Variável preditora</i>	<i>Valor predito w (mm)</i>	<i>Desvio padrão (mm)</i>	<i>IC 90%</i>
Tela		0,21	0,03	(0,17 ; 0,26)
SF	$d_{ELS} = 2,4 \text{ mm}$	0,16	0,02	(0,13 ; 0,20)
PF		0,21	0,02	(0,18 ; 0,25)
Tela		1,53	0,03	(1,47 ; 1,59)
SF	$d_{ELU} = 12 \text{ mm}$	1,52	0,02	(1,49 ; 1,56)
PF		1,49	0,02	(1,46 ; 1,53)

$d_{ELS}$  aberturas de fissura < a 0,21 mm  
**válidos para o ELS**

NBR 8890 limita tubos armados  $w = 0,25 \text{ mm}$

# Comparação curvas médias e classificação da norma



Tipo de reforço	$F_{ELS}$ (kN/m)			$F_{ELU}$ (kN/m)		
	Média	Desvio padrão	CV	Média	Desvio padrão	CV
Tela	22	1	3%	42	2	5%
SF-10	20	2	11%	4,4	0,4	9%
SF-20	25	4	18%	9,7	0,9	9%
PF-2,3	25	2	9%	5,8	0,4	7%
PF-4,6	21	6	29%	10	0,9	9%

- ✓ Dispersão maior no ELS, maior instabilidade
- ✓ Comportamento **equivalente ou melhor das fibras no ELS**

# Algumas conclusões

- ✓ Carregamento contínuo e LVDT -> **avaliação mais confiável do reforço** e procedimento **menos suscetível ao erro operacional**
- ✓ Eficiência das **fibras a baixos níveis de descolamento**
  - reforço híbrido (fibra + tela) pode resultar **otimização e maximização** do desempenho no ELS e ELU
- ✓ Correlações deslocamento diametral e abertura de fissura independem do reforço
  - Permitem estabelecer requisitos de cargas residuais equivalentes em termos de abertura de fissura

# Algumas conclusões

- ✓ **Condição mais justa para as fibras**
  - carga mínima isenta de fissuras
  - armados fissura de até 0,25 mm são permitidas
- ✓ **Controle em condições mais próximas aos novos modelos de dimensionamento** para as aplicações estruturais do CRF
  - controlar a capacidade resistente máxima do elemento
  - resistências residuais no ELS e ELU

**SIMULAÇÃO DO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO  
DO TCRF**

# Dimensionamento dos tubos de concreto

- ✓ Tubos de concreto simples e tubos de concreto com armadura convencional são tradicionalmente dimensionados:
  - Método direto -> modelos de cálculo consagrados
  - Método indireto -> determinação experimental da capacidade resistente
- ✓ TCRF:
  - Método direto -> novos métodos sendo propostos
  - Método indireto experimental -> pouco econômico, variados tipos e teores de fibras a serem avaliados
  - Método indireto simulação -> parametrização do CRF

# Modelo MAP

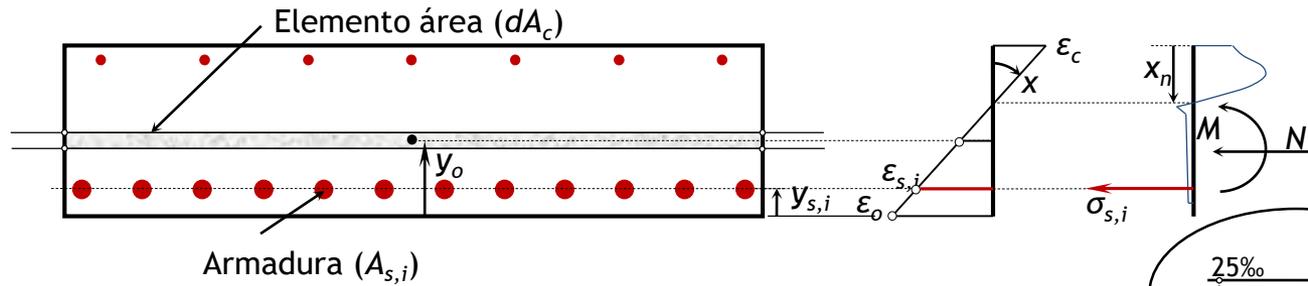
- ✓ Modelo MAP (*Model for the Analysis of Pipes*)
- ✓ Simulação numérica do ensaio de compressão diametral, possibilita estudar:
  - **Diferentes geometrias de tubo** e parâmetros do comportamento mecânico dos **materiais**;
  - Configurações de **armadura e classes resistentes** não abordadas nas normas técnicas disponíveis;
  - Inclusão de **fibras estruturais como reforço** e quantificar seu desempenho;
  - **Reforços híbridos** de armadura convencional e fibras.

# Modelo MAP

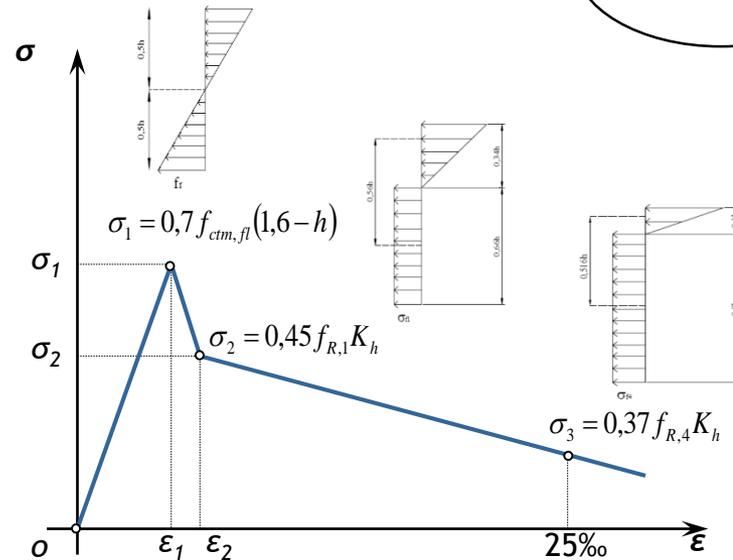
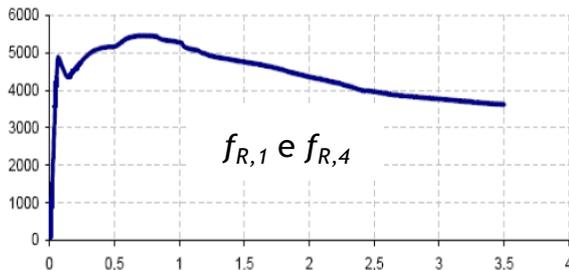
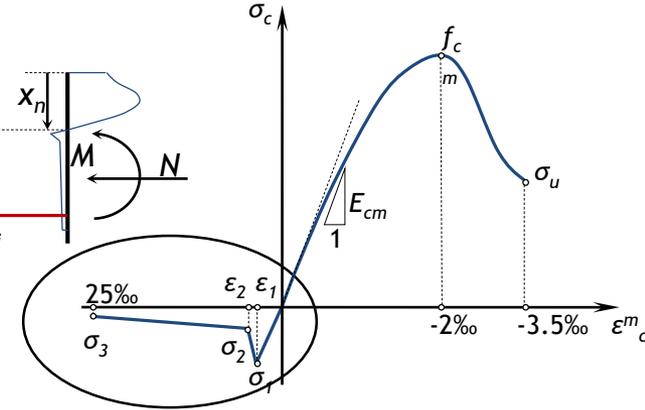
- ✓ Parametrização do comportamento pós-fissuração do CRF
  - equações empíricas da literatura (limita ao uso das mesmas fibras)
  - campanha experimental com ensaios de flexão (problemática da moldagem de prismas com o concreto dos tubos)

# Sub-rotina AES - simulação de seções

## Discretização da seção transversal do tubo



## Comportamento mecânico do CRF



Modelo Trilinear RILEM TC-156

Barros *et al.* (2005)

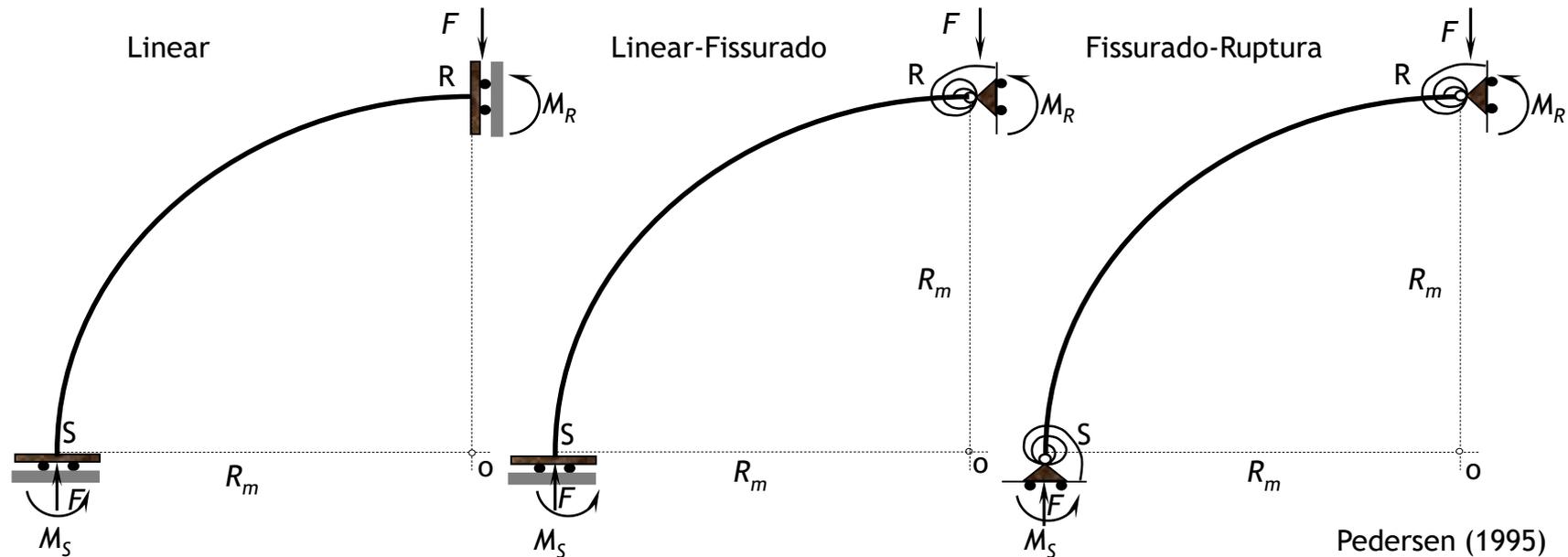
$$f_{R,1} = 0,0871 C_f + 0,702$$

$$f_{R,4} = 0,926 f_{R,1}$$



MESMAS FIBRAS

# Modelo de análise estrutural dos tubos



## Modelo de dano progressivo

Fase 1 - Comportamento elástico linear em todo o tubo

Fase 2 - Primeira fissura na coroa, perda de rigidez trabalhando em regime fissurado, resto do tubo se comporta elasticamente

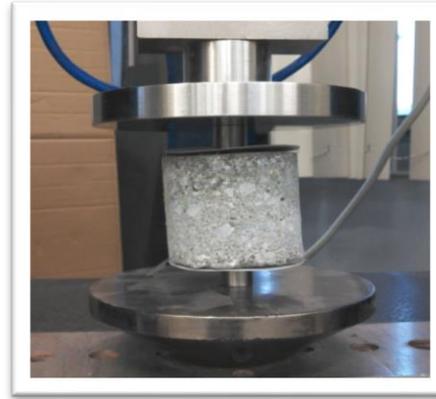
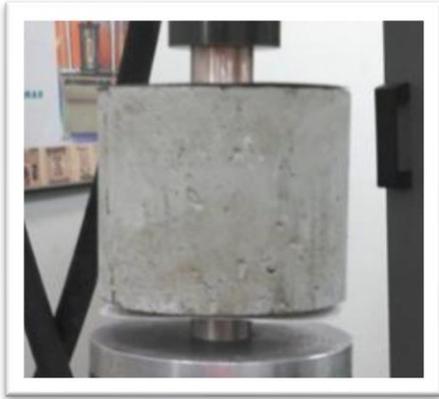
Fase 3 – Padrão de fissuração totalmente estabelecido, com uma fissura na coroa, uma na base e uma em cada flanco.

# Programa experimental

## Objetivos:

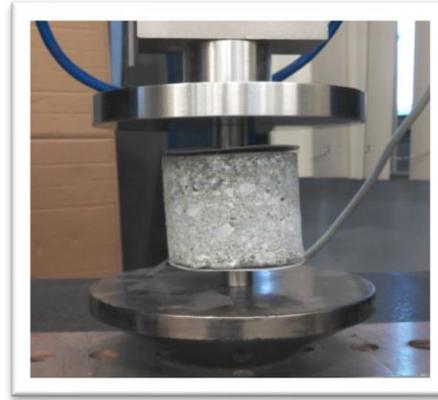
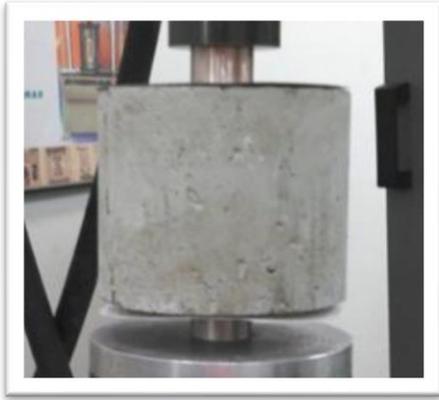
- ✓ **Caracterizar** o comportamento mecânico dos concretos utilizados na produção dos tubos com ensaio Barcelona
  - Corpos de prova **moldados**
  - Testemunhos **extraídos**
- ✓ **Simular** o comportamento de tubos no ensaio de compressão diametral com esses parâmetros - MAP
- ✓ **Comparar** com resultados experimentais do capítulo anterior

# Ensaio Barcelona – moldado e extraído

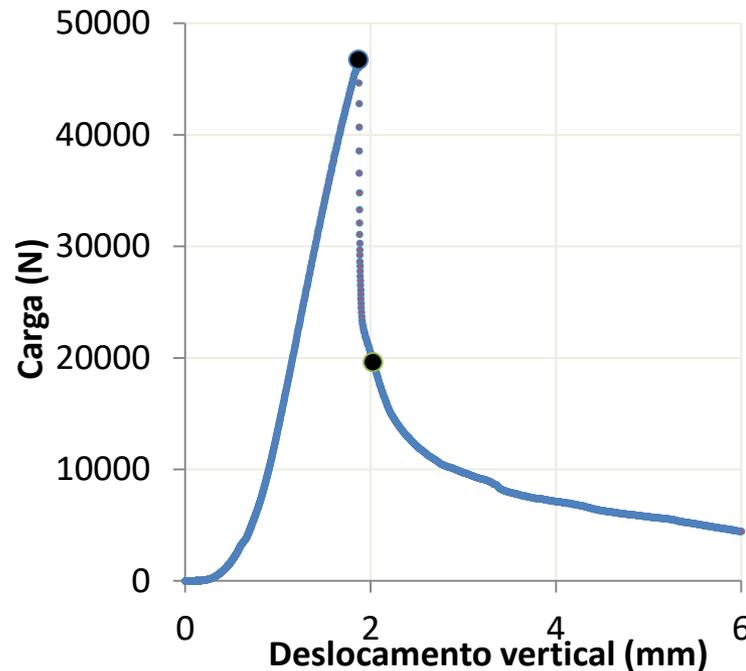


<b>Tipo</b>	<b>Dimensões dos discos de carga (mm)</b>	
	<b>Diâmetro – <math>a</math></b>	<b>Altura – <math>h</math></b>
Corpos de prova: Diâmetro – $d \cong 150$ mm Altura – $H \cong 150$ mm	37,5	30
Testemunhos: Diâmetro – $d \cong 75$ mm Altura – $H \cong 62$ mm	18,75	12,4

# Ensaio Barcelona – moldado e extraído

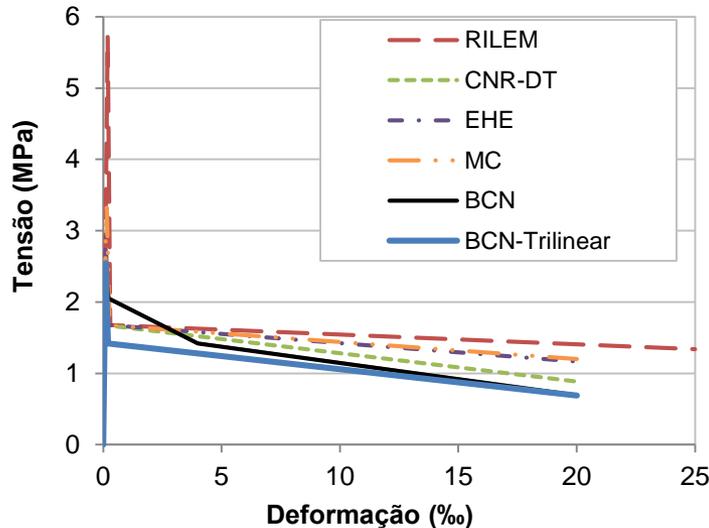
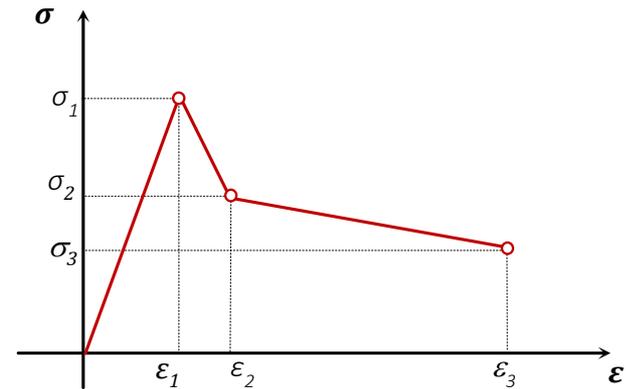
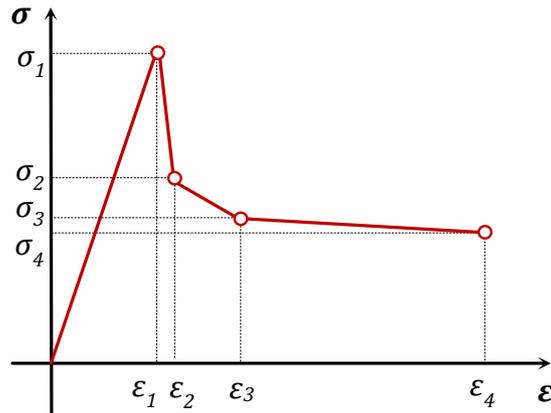


<b>Tipo</b>
Corpos de prova: Diâmetro – $d \cong 150$ mm Altura – $H \cong 150$ mm
Testemunhos: Diâmetro – $d \cong 75$ mm Altura – $H \cong 62$ mm



<b>carga (mm)</b>
<b>Altura – <math>h</math></b>
30
12,4

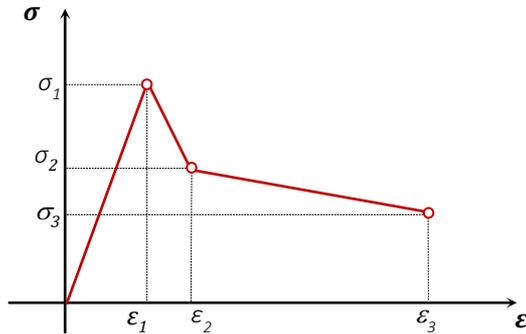
# Equações constitutivas baseadas no ensaio Barcelona



✓ Modelo trilinear mais conservador, principalmente na região associada à condição de serviço

✓ Permitir comparação mais fácil com outros modelos constitutivos já implementados no AES

# Equações constitutivas baseadas no ensaio Barcelona



$\sigma_1$  modelo de bielas e tirantes para evitar atribuir valor do coeficiente de atrito cinético ( $\mu_k$ )

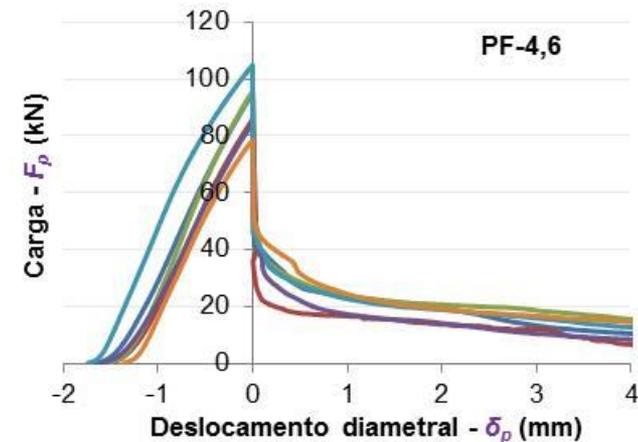
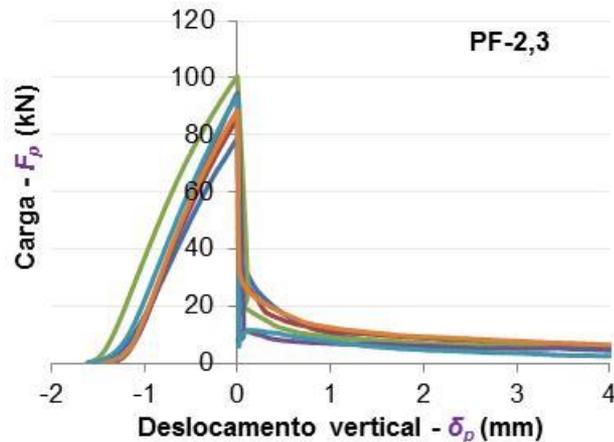
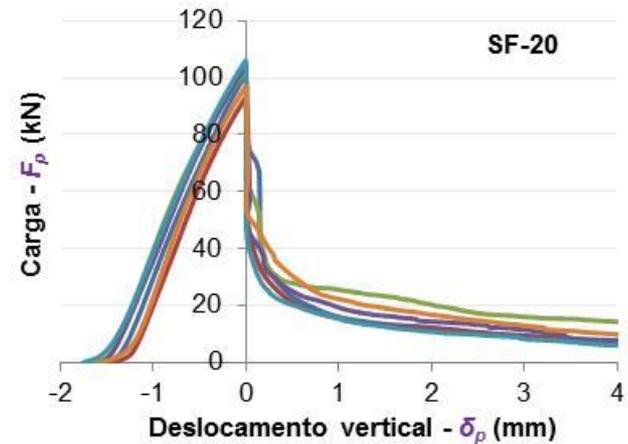
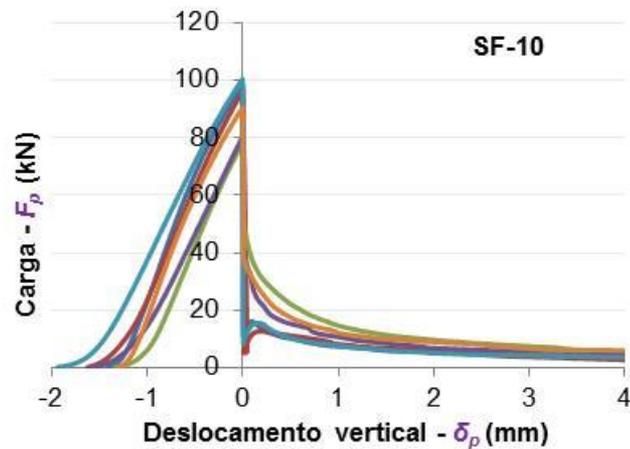
$$\Delta\delta_p = \frac{\Delta\varepsilon \times \pi \times R}{n \times \operatorname{tg}\beta \times \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{n}\right)} = \frac{0,0001 \times \pi \times 75 \text{ mm}}{3 \times \operatorname{tg}(0,436) \times \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{3}\right)} = 0,02 \text{ mm}$$

Deformação (‰)	Tensão (MPa)	
	Corpos de prova	Testemunhos
$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{cm}}$	$\sigma_1 = \frac{4 \times F_{P,max}}{9 \times \pi \times a \times H}$	$\sigma_1 = \frac{4 \times F_{P,max}}{9 \times \pi \times a \times H}$
$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 0,1$	$\sigma_2 = \frac{F_{P,0,02mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \sin \beta}{\sin \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$	$\sigma_2 = \frac{F_{P,0,01mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \sin \beta}{\sin \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$
$\varepsilon_3 = 20$	$\sigma_3 = \frac{F_{P,4mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \sin \beta}{\sin \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$	$\sigma_3 = \frac{F_{P,2,4mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \sin \beta}{\sin \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$

(Adaptado de Blanco et al., 2014)

# RESULTADOS E ANÁLISES

# Ensaio Barcelona – moldado

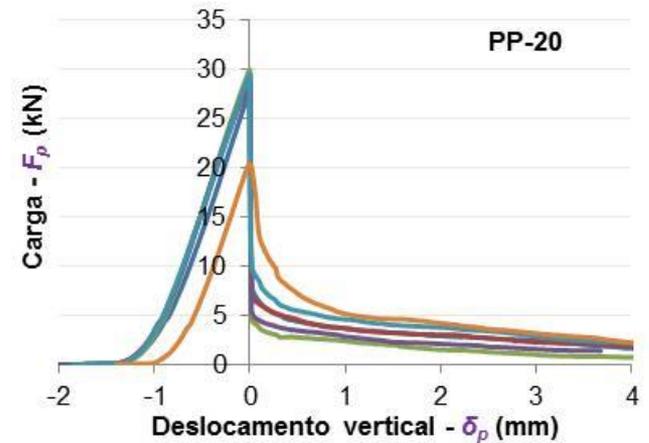
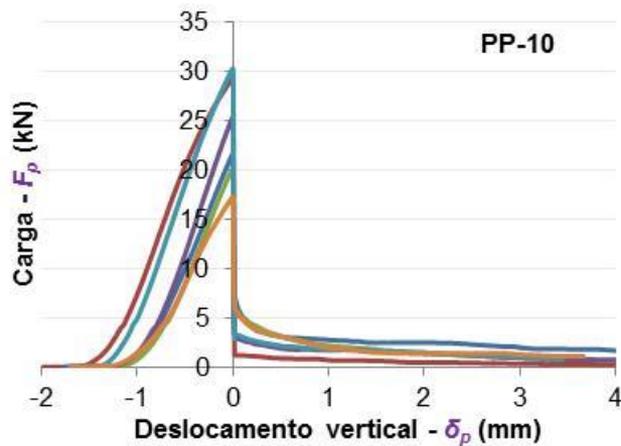
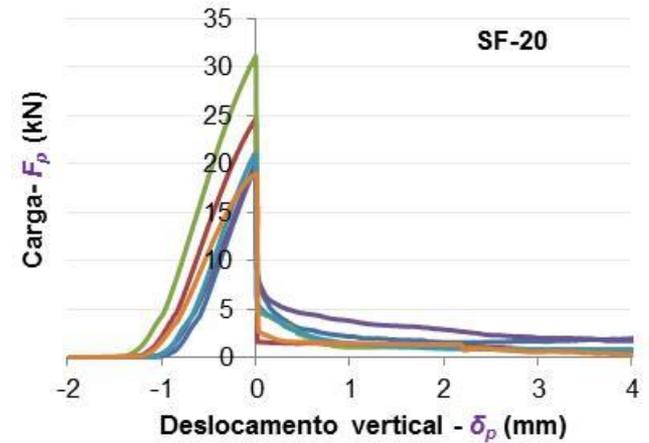
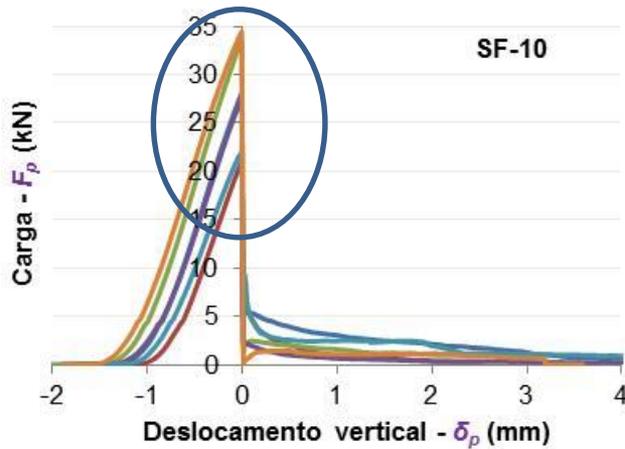


Comportamento semelhante entre as fibras

10 kg/m<sup>3</sup> de SF e 2,3 kg/m<sup>3</sup> de PF

20 kg/m<sup>3</sup> de SF e 4,6 kg/m<sup>3</sup> de PF

# Ensaio Barcelona – extraído



Dispersão muito mais acentuada para a carga máxima

Carga residual muito baixa – testemunho pequeno

# Moldado X extraído

Tipo de reforço	Teor de fibras (kg/m <sup>3</sup> )	Cargas de punção (kN)			
		$F_{p,max}$ (CV)	$F_{p,0,02mm}$ (CV)	$F_{p,4mm}$ (CV)	
MOLDADO	SF	10	96,4 (4%)	31,1 (33%)	5,4 (11%)
		20	100,6 (5%)	47,6 (20%)	8,8 (35%)
	PF	2,3	92,6 (6%)	29,0 (24%)	5,3 (13%)
		4,6	90,5 (11%)	42,3 (8%)	13,4 (16%)

Tipo de fibra	Teor de fibras (kg/m <sup>3</sup> )	Cargas de punção (kN)			
		$F_{p,max}$ (CV)	$F_{p,0,01mm}$ (CV)	$F_{p,2,4mm}$ (CV)	
EXTRAÍDO	SF	10	27,8 (20%)	3,7 (50%)	0,9 (61%)
		20	22,6 (20%)	4,7 (49%)	1,3 (46%)
	PF	2,3	24,0 (22%)	4,9 (29%)	1,5 (33%)
		4,6	27,7 (13%)	6,9 (28%)	2,6 (32%)

✓ **Moldado menor dispersão** para as cargas máximas e residuais

✓ Extraído SF pior caso, **poucas fibras** no testemunhos

# Parâmetros do CRF utilizados para a simulação numérica

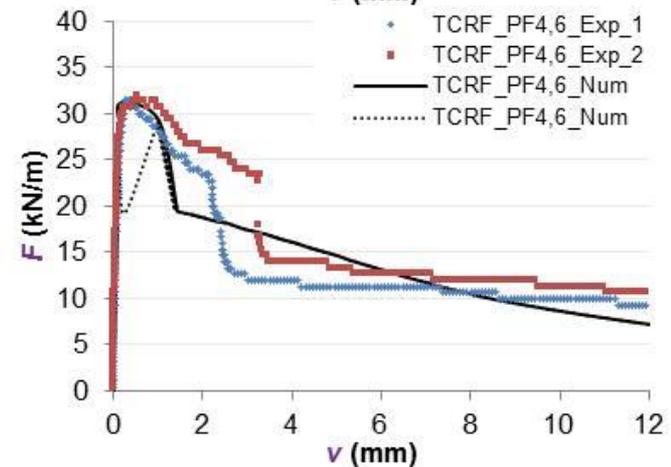
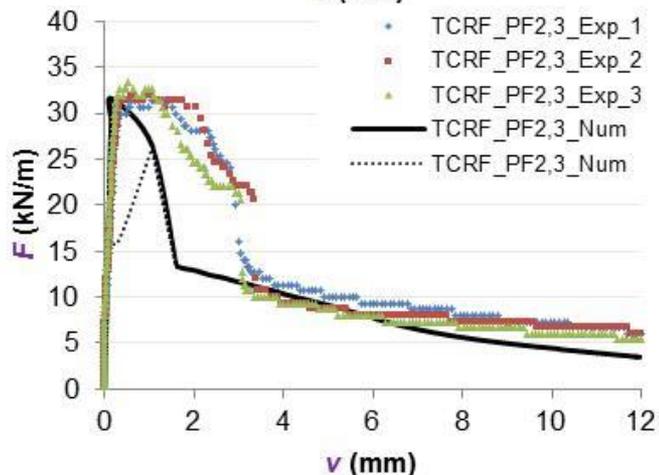
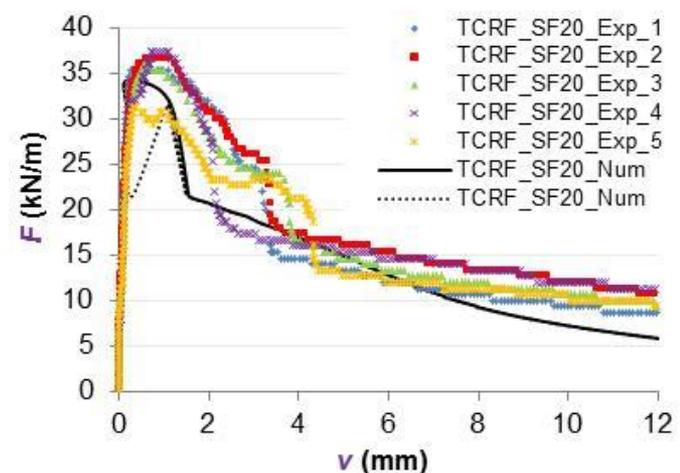
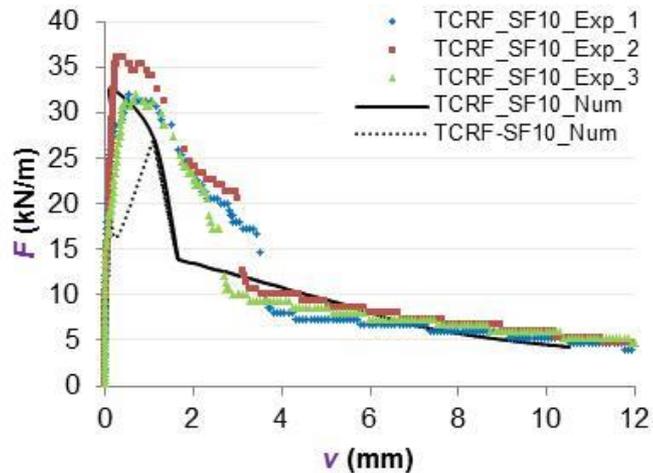
<i>Tipo de fibra</i>	$C_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$f_{ck}$ (MPa)	$E_{cm}^1$ (MPa)	$\sigma_{1^*}$ (MPa)	$\epsilon_1$ (‰)	$\sigma_2$ (MPa)	$\epsilon_2$ (‰)	$\sigma_3$ (MPa)	$\epsilon_3$ (‰)
SF	10	25	28000	4,7	0,172	0,65	0,272	0,12	25
	20	25	28000	4,9	0,179	1,01	0,279	0,20	25
PF	2,3	25	28000	4,5	0,165	0,62	0,265	0,12	25
	4,6	25	28000	4,4	0,161	0,89	0,261	0,30	25

✓ Ensaio Barcelona **medida indireta da tensão de tração**

✓ Converter para **tensão de tração na flexão** utilizado coeficiente indicado no *fib* Model Code

$$\sigma_{1^*} = \frac{\sigma_1}{\alpha} \quad \alpha = \frac{0,06 \times h^{0,7}}{1 + 0,06 \times h^{0,7}}$$

# Simulação numérica x experimental



- ✓ Simulação com ensaio Barcelona **ajustaram bem aos resultados experimentais**
- ✓ **Descompasso na região após a carga de pico, pode estar associada a instabilidade do ensaio**

# Simulação numérica x experimental

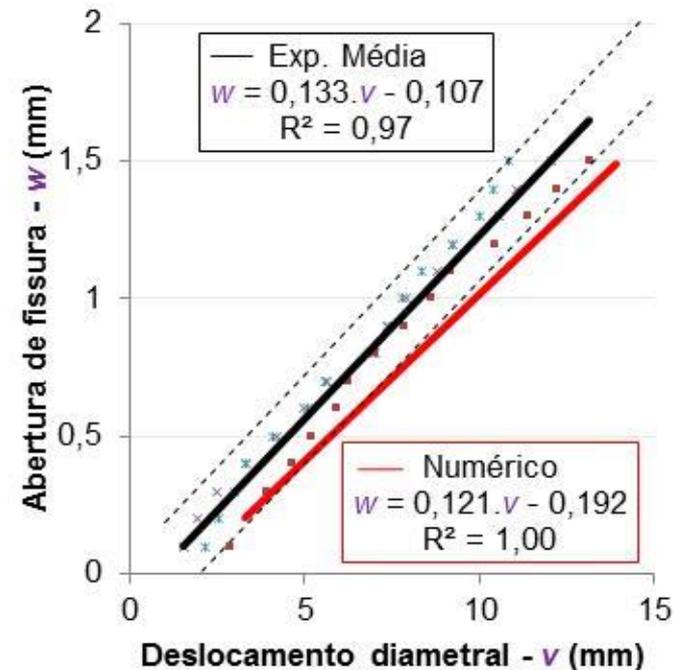
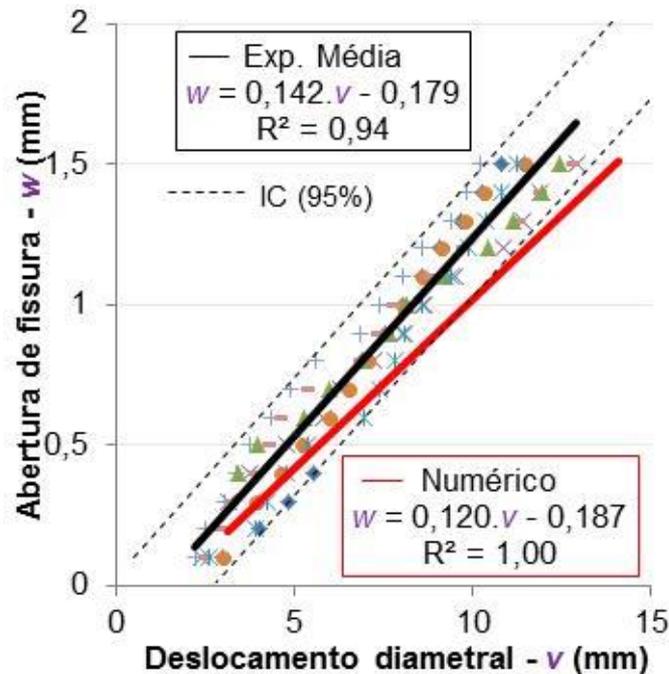
	TCRF-SF10			TCRF-SF20			TCRF-PF2,3			TCRF-PF4,6		
	Exp. (kN/m)	MAP (kN/m)	$\xi$ (%)									
$F_{cr}$	27	33	-21	30	34	-15	29	32	-10	28	31	-13
$F_{max}$	33	33	1	36	34	4	32	32	2	32	31	1
$F_{0,10}$	22	13	39	26	20	22	28	12	57	25	18	28
$F_{0,25}$	12	11	9	22	18	19	23	11	52	18	17	9
$F_{0,50}$	8	8	1	15	13	8	10	8	14	13	13	2
$F_{1,00}$	6	5	29	12	7	39	7	5	39	11	9	22

✓ MAP tende a superestimar o valor de carga de fissuração ( $F_{cr}$ )

- erro na estimação da tensão de flexão a partir do Barcelona

✓ Cargas residuais em média o desvio é de 24% a favor da segurança

# Simulação numérica x experimental



Modelo numérico no interior ou muito **próximos ao intervalo de confiança dos resultados experimentais**  $w$ - $v$  independentes do tipo de reforço, se trata de uma relação essencialmente geométrica.

# Algumas conclusões

- ✓ Simulação numérica com parâmetros do ensaio Barcelona **representou o comportamento dos tubos** no ensaio de compressão diametral.
- ✓ Ensaio Barcelona mostrou-se adequado para caracterização do comportamento mecânico do CRF para produção de tubos.
- ✓ Utilizar corpos de prova moldados.

# Algumas conclusões

- ✓ Simulação numérica também apresentou uma relação linear entre o deslocamento diametral e a abertura de fissura
  - **independente** do tipo de reforço utilizado
  - **próxima** aos resultados experimentais
- ✓ Endossa a adoção de nova proposta de ensaio de compressão diametral do tubo controlando a resistência residual no ELS e ELU.



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

Programa de Pós-Graduação

**ENGENHARIA CIVIL**

---

# Closed loop control in crushing test for fibre reinforced concrete pipes

Renata Monte (USP, São Paulo)

Albert de la Fuente (UPC, Barcelona)

Antonio Figueiredo (USP, São Paulo)

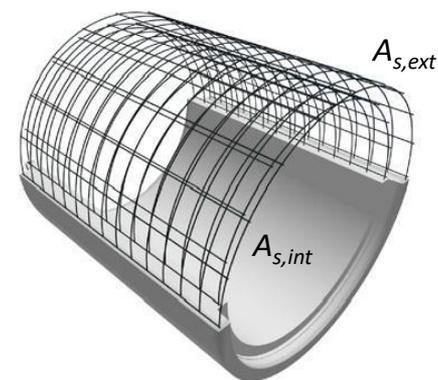
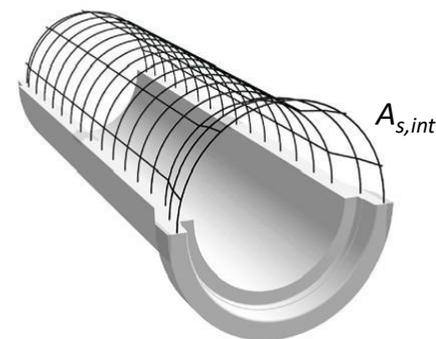
---

# INTRODUCTION

- Concrete pipes are widely used in infrastructure construction, especially sewage and drainage systems
  - Several countries, like Brazil, highly demand this kind of construction
  - Others could need the substitution of old pipelines
- Fibres have been studied for total or partially substitution of the steel-bars with technical and economic advantages

## Minimum amount of rebars in EN 1916:2002 for traditional reinforced concrete pipes

Diámetro	CLASS 60		CLASS 90		CLASS 135		CLASS 180	
	$F_f = 40 \text{ kN/m}^2$		$F_f = 60 \text{ kN/m}^2$		$F_f = 90 \text{ kN/m}^2$		$F_f = 120 \text{ kN/m}^2$	
	$F_n = 60 \text{ kN/m}^2$		$F_n = 90 \text{ kN/m}^2$		$F_n = 135 \text{ kN/m}^2$		$F_n = 180 \text{ kN/m}^2$	
	$A_{s,int}$	$A_{s,ext}$	$A_{s,int}$	$A_{s,ext}$	$A_{s,int}$	$A_{s,ext}$	$A_{s,int}$	$A_{s,ext}$
$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$		$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$		$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$		$f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$		
300	-	-	2,0	-	2,0	-	2,1	-
400	-	-	2,0	-	2,3	-	2,9	-
500	-	-	2,0	-	3,3	-	4,3	-
600	-	-	2,0	-	4,6	-	6,1	-
700	-	-	3,3	-	5,9	-	7,6	2,5
800	-	-	3,8	-	5,1	2,4	7,5	4,5
900	-	-	3,2	2,1	5,5	3,3	8,5	5,1
1000	2,3	2,0	3,7	2,3	6,2	3,7	9,5	5,7
1100	2,6	2,0	4,2	2,5	7,0	4,2	10,8	6,5
1200	2,9	2,0	4,7	2,8	7,8	4,7	12,2	7,3
1300	3,5	2,0	5,3	3,2	8,8	5,3	**	**
1400	3,8	2,2	6,0	3,6	9,9	6,0	**	**
	$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$		$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$		$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$		$f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$	
1500	4,4	2,6	6,6	3,9	11,0	6,6	**	**
1600	5,0	3,0	7,7	4,6	12,4	7,5	**	**
1800	6,1	3,7	9,4	5,6	14,9	8,9	**	**
2000	7,1	4,3	11,4	6,8	**	**	**	**
	$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$		$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$		$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$		$f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$	
2500	10,8	6,5	16,6	10,0	**	**	**	**
3000	**	**	**	**	**	**	**	**



Minimum amount of rebars in EN 1916:2002 for traditional reinforced concrete pipes

	CLASS 60	CLASS 90	CLASS 135	CLASS 180
--	----------	----------	-----------	-----------

There are design tables gathered in the EN 1916:2002 in which the minimum amount of traditional reinforcement for each  $D_i$  and each Strength Class. Then, the Crushing Test (CT) has to be used only as control method



**NEVERTHELESS**

For fibre reinforced concrete pipes there are neither design tables nor any methodology to deal with the assessment of  $C_f$

The TEBT is used as an indirect design method (trial and error) which is inefficient and uneconomical since there are a huge combination of diameters, thickness and strength classes as well as a great variety of suitable structural fibres

# INTRODUCTION

- Historically is known **limitation of FRC tests carried out with open-loop systems**, which leads to uncertainties in the residual strength determination for low crack opening levels
- These studies demonstrated that the **open-loop system** flexural test performed with prismatic specimens **may provide a reduction of the residual strength measured**, comparing to the values obtained with closed-loop systems

# INTRODUCTION

- Lower reliability and accuracy of open-loop tests **induced the adoption of closed loop systems** for FRC flexural standard tests
  - ASTM C1609 (2012)
  - EN14651 (2007)
  - JCI-S-002 (2003)
- The standard tests for concrete pipes did not follow the same tendency

# OBJECTIVES

- Comparing TEBTs performed with different control systems
- Establishment of correlations between pipes diametric displacement and pipes crack width
- Use of constitutive equation derived from Barcelona tests to simulate the TEBT behaviour
- Compare the TEBT simulation with closed loop control experimental results

## EXPERIMENTAL PROGRAM

18 pipes with DN = 1000 mm and wall thickness = 90 mm

Material	Dosage
Sand from crushing ( $d_{max} = 4.8$ mm)	780 kg/m <sup>3</sup>
Crushing aggregate ( $d_{max} = 9.5$ )	1200 kg/m <sup>3</sup>
Cement	320 kg/m <sup>3</sup>
Water	110 l/m <sup>3</sup>
Steel Fibres ( $\lambda = 80$ and $l_f = 60$ mm)	10, 20, 30 kg/m <sup>3</sup>

The CPs were produced in an industry situated in the state of São Paulo

Produced by using vibro-compression system



Strength class: C60

Proof load:  $F_c \geq 40$  kN/m

Maximum load:  $F_{max} \geq 60$  kN/m

## EXPERIMENTAL PROGRAM

- Simultaneously with the pipe production, five cylindrical specimens with 150 mm of diameter and 300 mm of height were moulded
  - 2 specimens for compressive tests
  - 3 specimens were cut in half height for the Barcelona tests (6 tests)



# PIPE CRUSHING TEST

Actuator



Rigid frame

LVDTs were fixed in the pipe

Crack width measurement

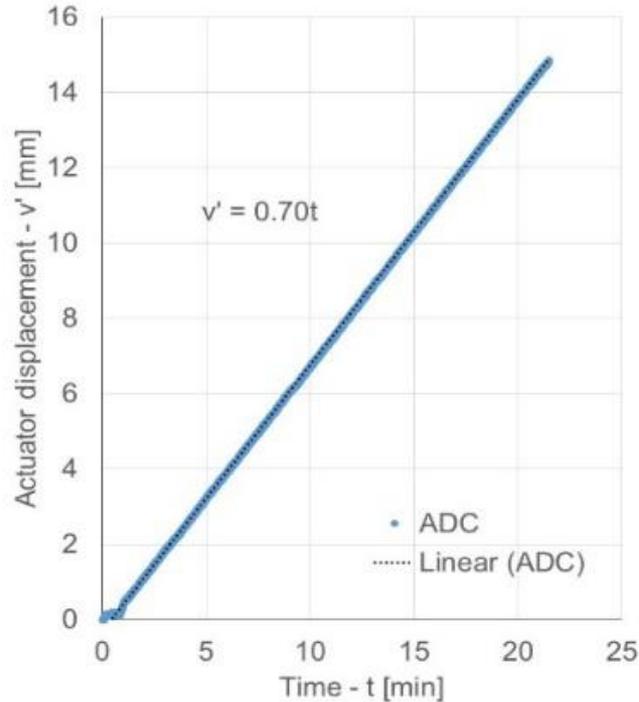


Diametric displacement measurement

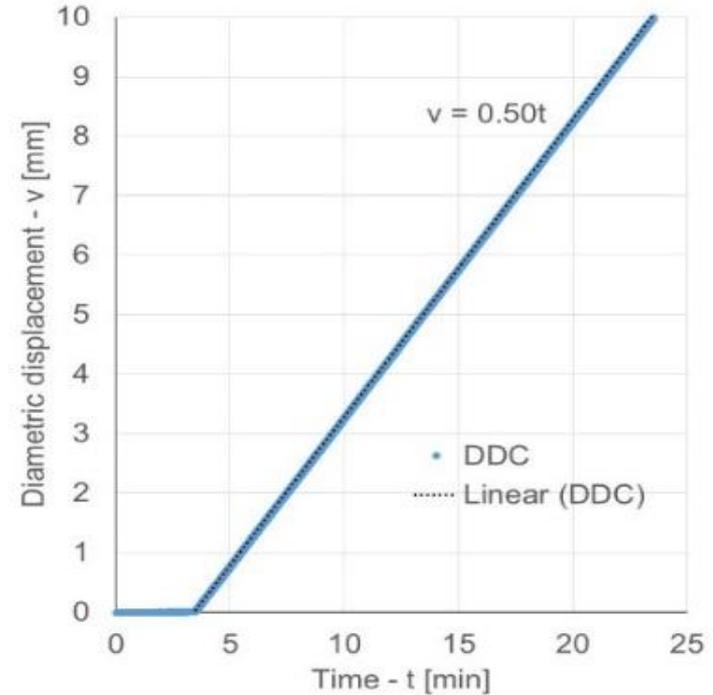
## EXPERIMENTAL PROGRAM

- TEBTs were performed using a 200 kN hydraulic servo-actuator
- Servo-controller - digital loop at a frequency of 4 kHz
- Two types of closed-loop control were tested
  - Actuator displacement control (ADC): an internal LVDT provides the displacement signal for position feedback
  - Diametric displacement control (DDC): feedback control is provided through a LVDT positioned at the crown
- These results were compared to open-loop control results (load control - LC) presented in de la Fuente *et al.* (2012)
  - Same resistant class, diameter and produced in the same industry

## EXPERIMENTAL PROGRAM



0.7 mm/min for ADC



0.5 mm/min for DDC

The controller performed a very constant rate of displacement, either by actuator or by LVDT

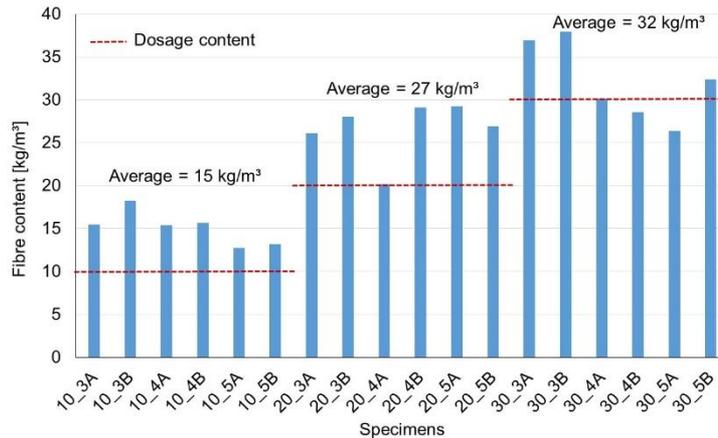
## RESULTS AND DISCUSSION

Fibre contents do not result in significant difference in the compressive strength (p-value = 0.701)

BCN residual loads present coefficient of variation between 9% and 23%

$C_f$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Compressive test		Barcelona test	
	$f_{cm}$ [MPa]	$F_{p,cr}$ [kN]	$F_{p,0.02}$ [kN]	$F_{p,4.8}$ [kN]
10	49.4 (7%)	139.3 (2%)	87.9 (20%)	12.5 (23%)
20	50.5 (3%)	134.0 (11%)	103.9 (16%)	23.1 (18%)
30	47.7 (8%)	124.0 (9%)	95.5 (9%)	22.0 (21%)

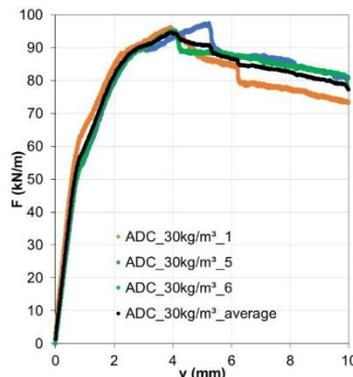
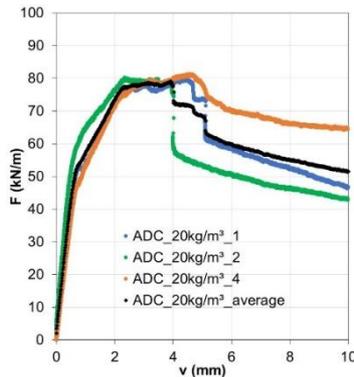
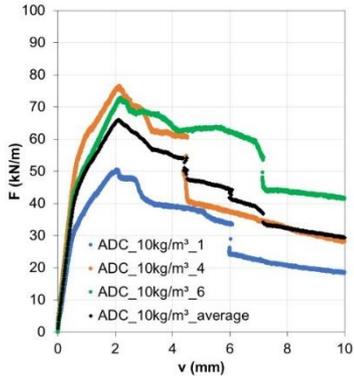
Residual loads of the 30 kg/m<sup>3</sup> can be considered statistically equal of the 20 kg/m<sup>3</sup> (p-value = 0.617 for  $F_{p,0.02}$  and 0.988 for  $F_{p,4.8}$ )



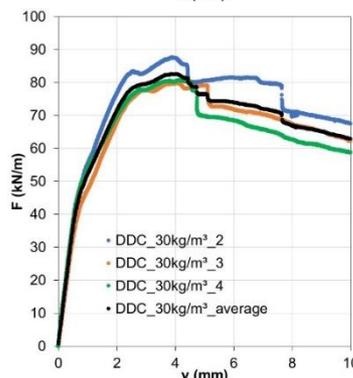
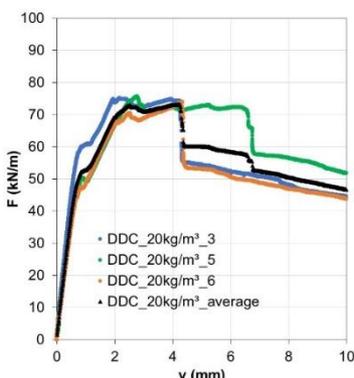
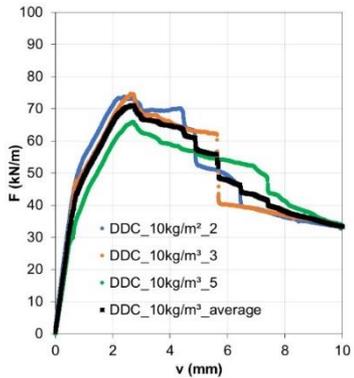
Inductive method shows that the real fibre content between the design content of 20 and 30 kg/m<sup>3</sup> was very similar

# RESULTS AND DISCUSSION

ADC



DDC

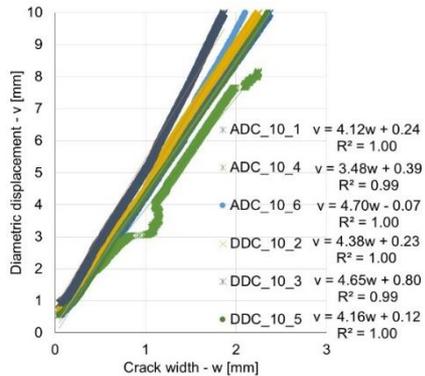


TEBT results presented low dispersion (except for the 10 kg/m<sup>3</sup> tested in ADC)

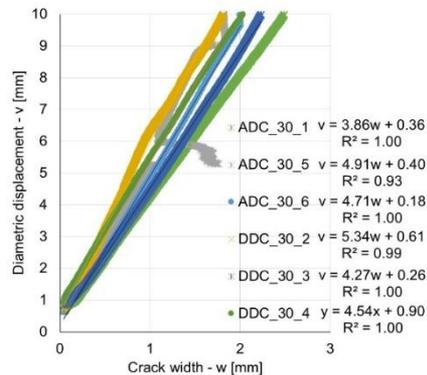
Pipes behaviour increased with fibre content

Closed-loop control provided by the actuator or pipe displacement can be considered equivalents

## RESULTS AND DISCUSSION



The relation  $w-v$  is useful to establish the level of crack opening during the post-cracking regime and the respective displacements

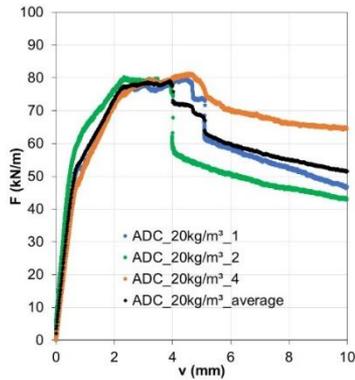


It is possible to associate diametric displacements to the service limit state ( $d_{SLS}$ ) and ultimate limit state ( $d_{ULS}$ )

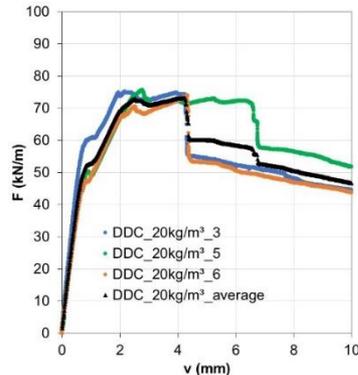
The relation  $w - v$  is linear

$$v = a \cdot w + b$$

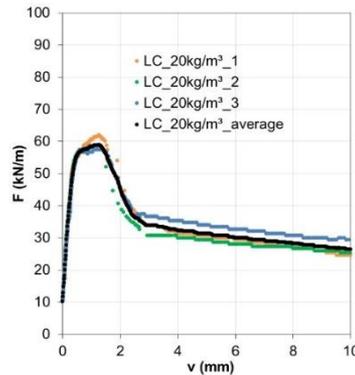
## RESULTS AND DISCUSSION



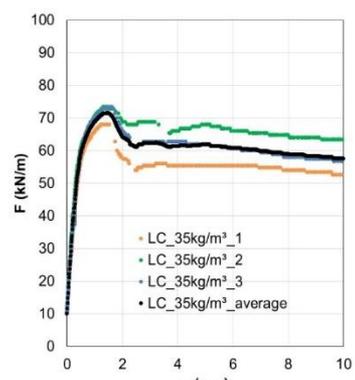
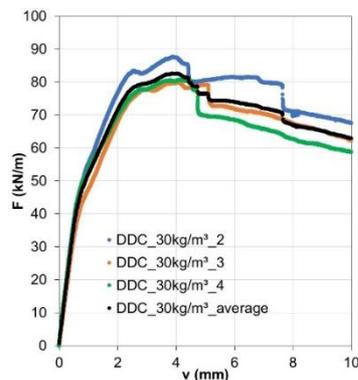
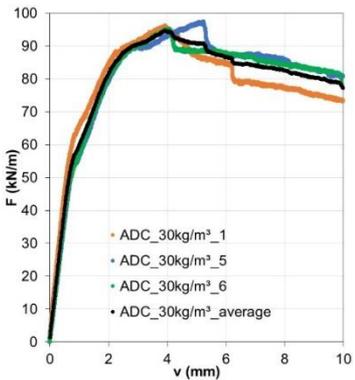
ADC



DDC



LC



TEBTs performed with a open-loop control (LC) show significantly lower results

Pipes were produced to achieve the same resistant class (C60)

The requirements are reached with 10 kg/m<sup>3</sup> of fibres for ADC or DDC

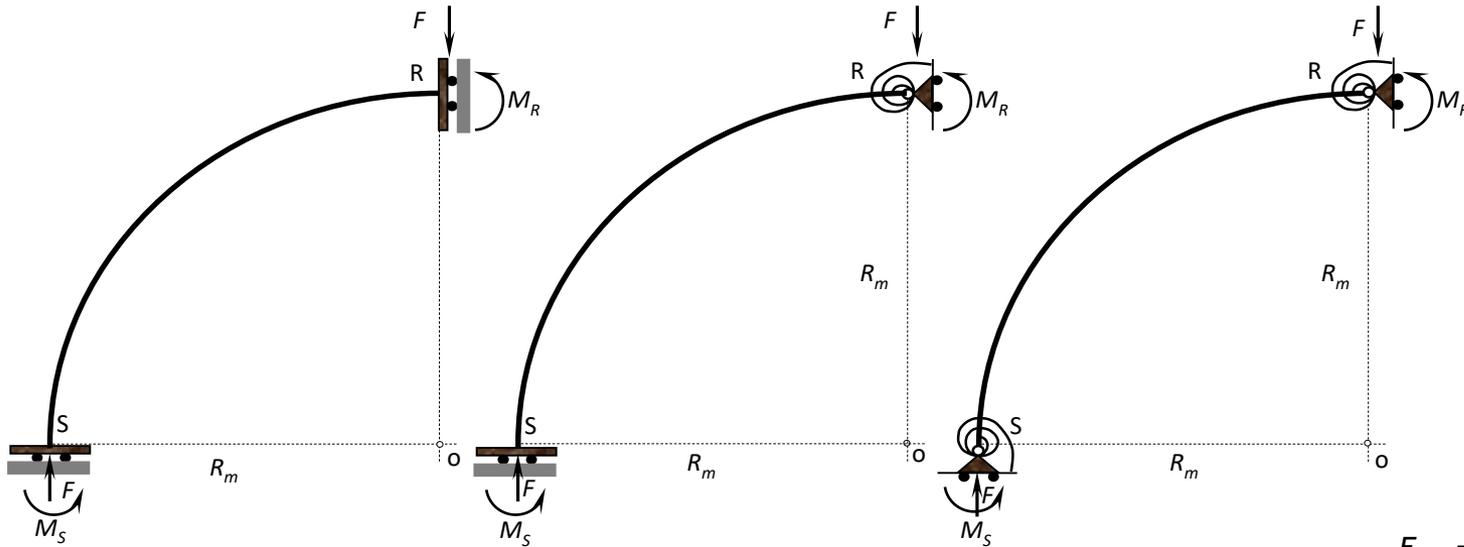
In LC results the class C60 are reached with 35 kg/m<sup>3</sup> of fibres

# Simulation of the Crushing Test (Three Edge Bearing Test, TEBT)

Stage 1: Linear behaviour

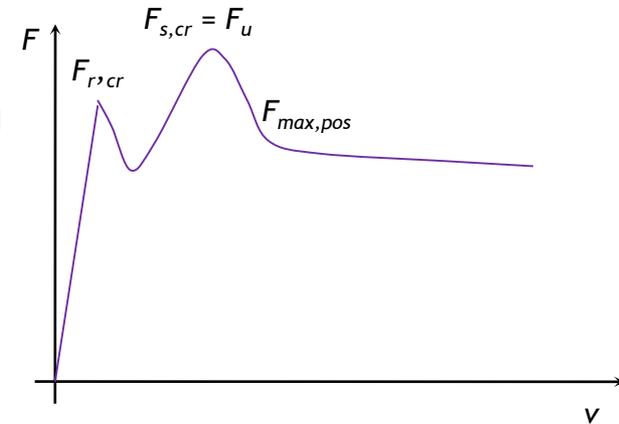
Stage 2: Cracking at crown

Stage 3: Cracking at crown and at haunches



1. The mechanical response of the pipe could be modelled by considering only a quarter of circle (because of the double symmetry existing) and two plastic hinges (one in the crown and other in the haunch) which control the non linear behaviour of the pipe
2. The quarter of circle behaves linearly during the whole simulation process.

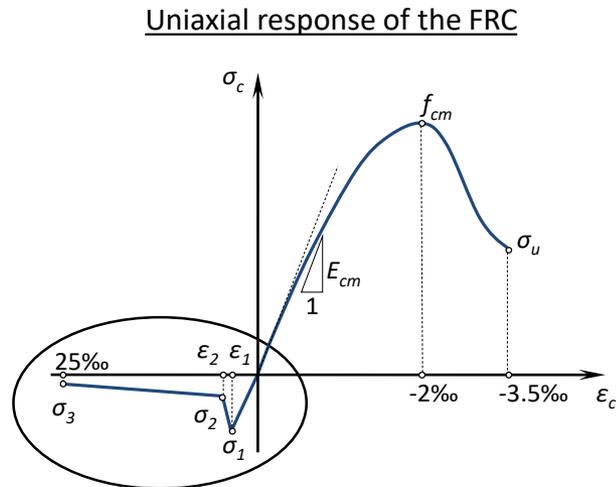
de la Fuente *et al.* (2012, 2013)



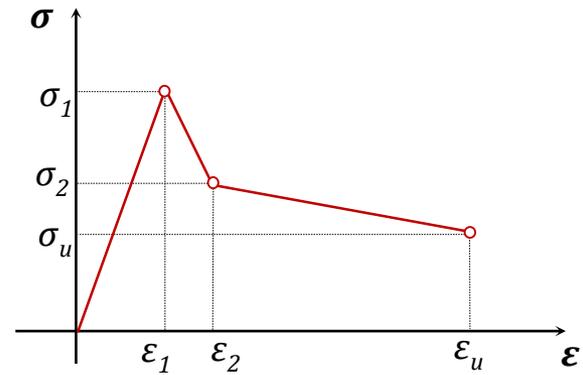
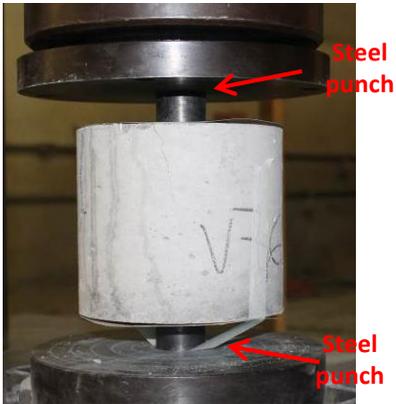
## Simulation of the non linear hinges (Analysis of Evolutive Sections AES)

CONCRETE is discretized by layers of constant thickness:

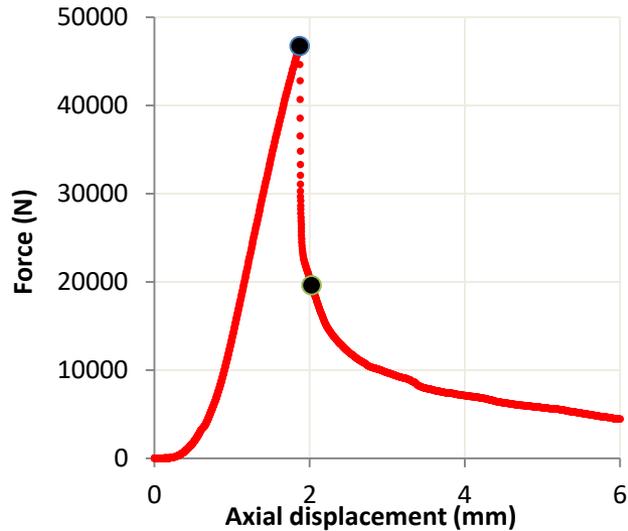
- The uniaxial tensile behaviour of the FRC had been simulated by means of flexural tests
- The constitutive equation derived from BCN tests is alternatively used to simulate the tensile behaviour of FRC



# CONSTITUTIVE EQUATIONS BASED ON BARCELONA TEST



Simplified trilinear  $\sigma$ - $\epsilon$  diagram used in MAP



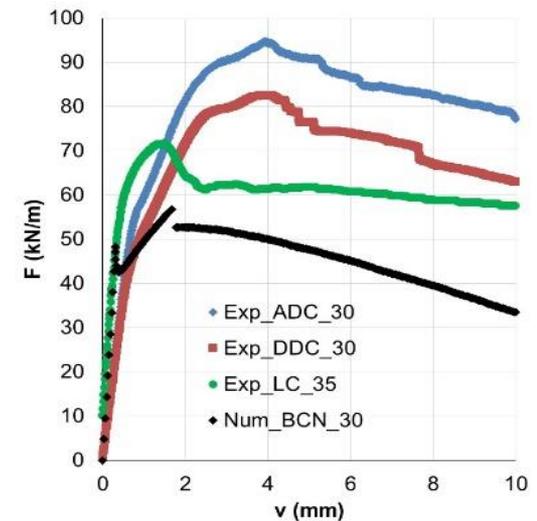
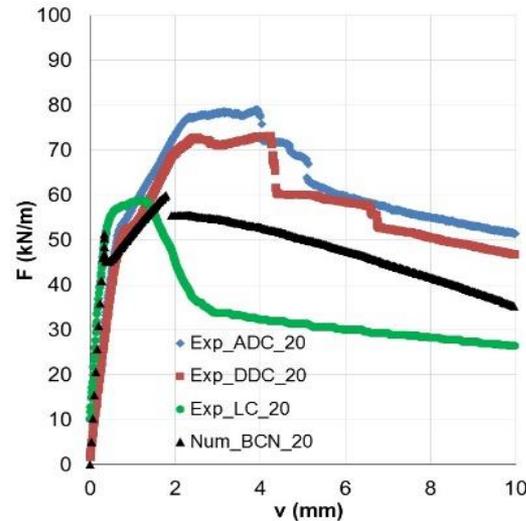
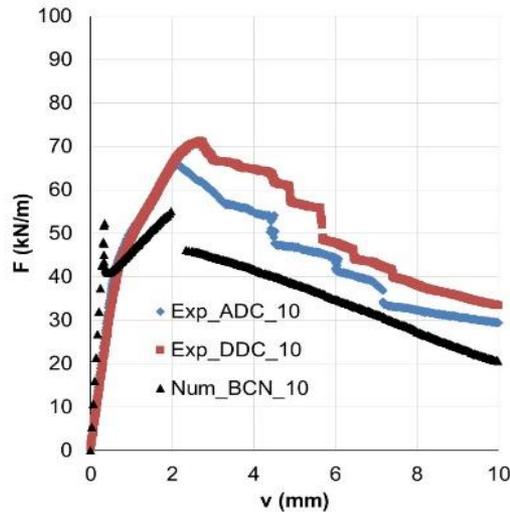
Strain [‰]	Stress [MPa]
$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{cm}}$	$\sigma_1 = f_{ctm} = \frac{4 \cdot F_{Pmax}}{9 \cdot \pi \cdot a \cdot H}$
$\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0.1$	$\sigma_2 = f_{Rm,0.02} = \frac{F_{P0.02mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \sin \beta}{\sin \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$
$\epsilon_3 = 25$	$\sigma_4 = f_{Rm,4.8} = \frac{F_{P4.8mm}}{2 \cdot \pi \cdot A} \cdot \frac{\cos \beta - \mu_k \cdot \sin \beta}{\sin \beta + \mu_k \cdot \cos \beta}$

(Monte et al., ACI Structural Journal, 2016)

# NUMERICAL ANALYSIS

Parameters to define the constitutive equation of the tensioned FRC using BCN tests

$C_f$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\sigma_1$ (MPa)	$E_{cm}$ (MPa)	$\epsilon_1$ (‰)	$\sigma_2$ (MPa)	$\epsilon_2$ (‰)	$\sigma_3$ (MPa)	$\epsilon_3$ (‰)
10	6.219	36292	0.171	1.799	0.271	0.255	25
20	5.983	36292	0.165	2.128	0.265	0.473	25
30	5.539	36292	0.153	2.011	0.253	0.452	25



MAP model presents post-cracking tendency similar to that obtained experimentally  
 MAP model is capable to reproduce, from the safe side, the post-cracking tendency

## CONCLUDING REMARKS

- The results demonstrated that the use of a closed-loop control system produced superior results than the open system
- The open-loop system, regularly employed to control the CPs, is in the safety side, underestimating the residual strength capacity of the components.
- The crack load was not influenced by the test set up as expected
- These outcomes indicate that there is an interesting margin of optimization for fibre reinforcement design

## CONCLUDING REMARKS

- The optimization must be supported by adequate technological support, both in terms of quality control and design in order to guarantee the reliability of the industrial production of these elements
- The use of the model MAP in combination with the Barcelona test results is capable to reproduce, from the safe side, the post-cracking tendency
- The numerical simulation for the pipe with  $30 \text{ kg/m}^3$  should be reconsidered, as the differences can be directly attributed to the dispersion of the FRC characterization