



CONCRETO PROJETADO REFORÇADO COM FIBRAS PARA TÚNEIS

Prof. Dr. Antonio D. de Figueiredo
Departamento de Engenharia de Construção Civil
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Reforçado Com Fibras



Cidade das Artes, Valência (Espanha)

Concreto projetado branco reforçado com fibras

5 cm de espessura

Macro fibras de PP



Macrofibras poliméricas

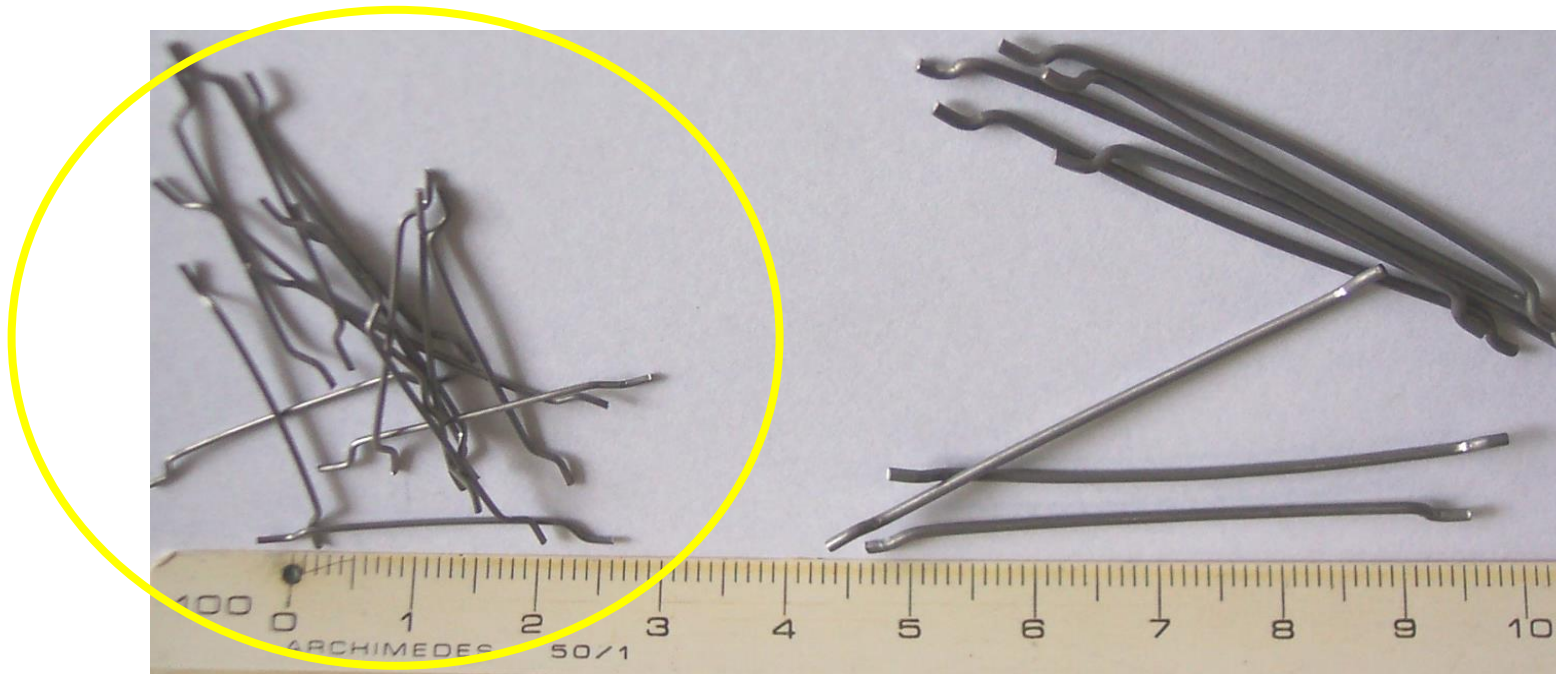


Atuam no reforço
do concreto

Fibras

As fibras são elementos descontínuos, cujo comprimento é bem maior que a maior dimensão da seção transversal.

Fibras de aço:



Fibras de aço já possuem normalização brasileira:
NBR 15530:07 – Fibras de aço para concreto - Especificação.

Micro fibras de PP

Polipropileno
monofilamento

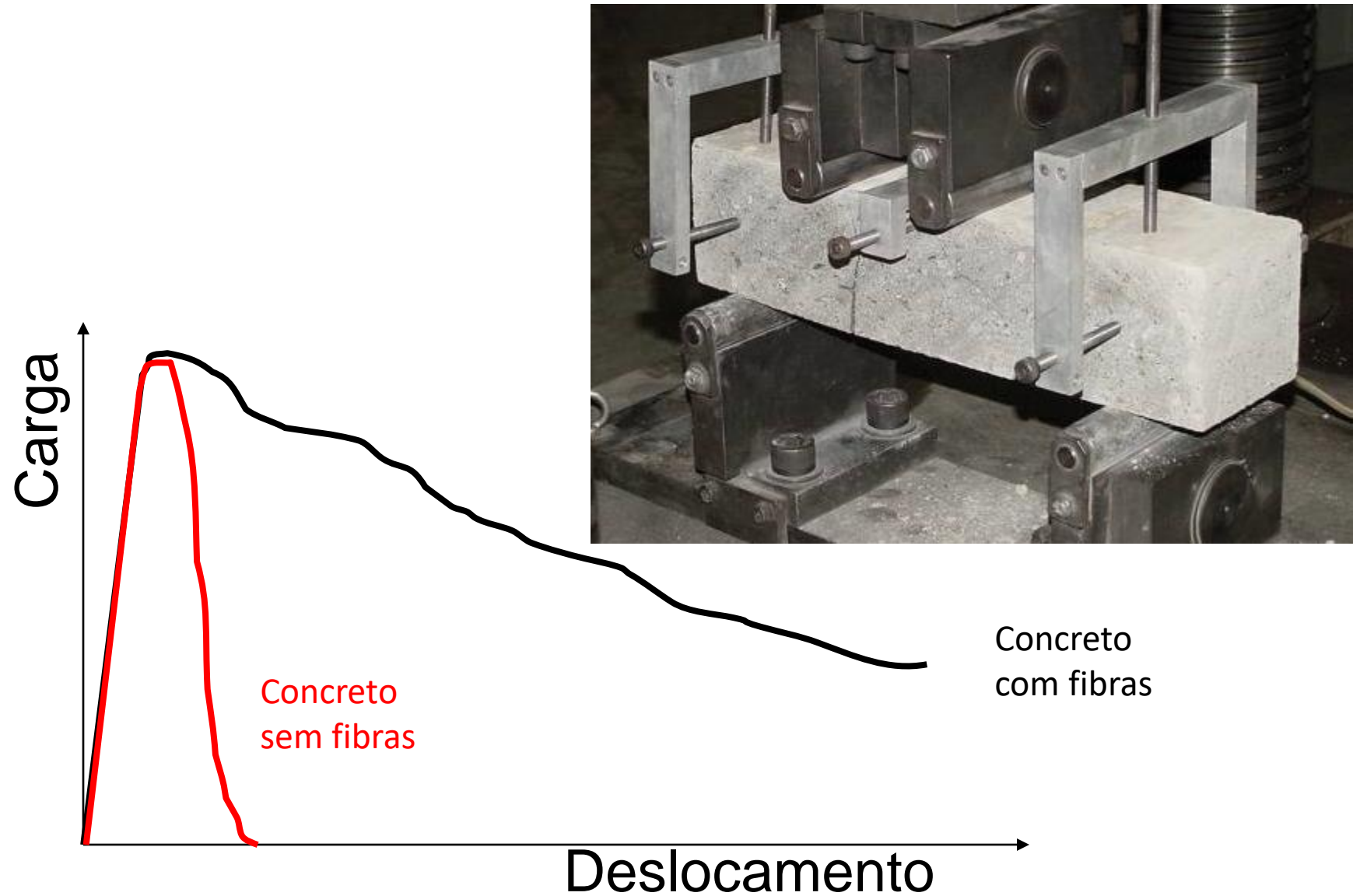


Polipropileno
fibrilada

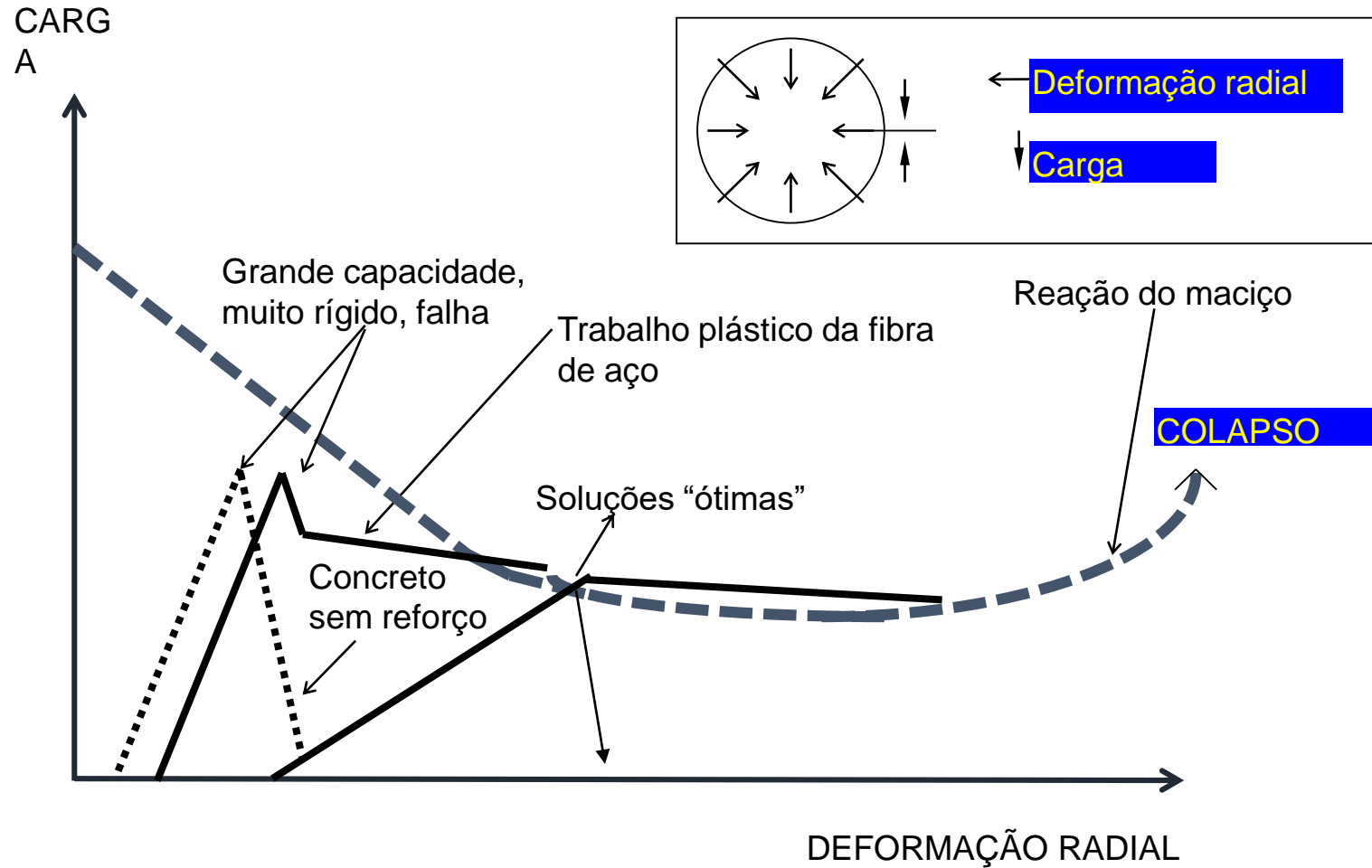


Atuam somente na
prevenção de
lascamento explosivo no
caso de incêndio

Resistência residual



Modelo (NATM)



Vantagens do CPRF em túneis

- O CPRFA pode ser aplicado imediatamente após a escavação (menor risco de acidentes)
- Maior velocidade de execução do túnel
 - com o CPRFA o ciclo (ST $\sim 50\text{m}^2$) 5 \rightarrow 3 horas
 - maior exigência quanto à resistência inicial (CELESTINO, 1996)
- Maior controle da fissuração associada ao revestimento primário (ARMELIN et al. 1994)

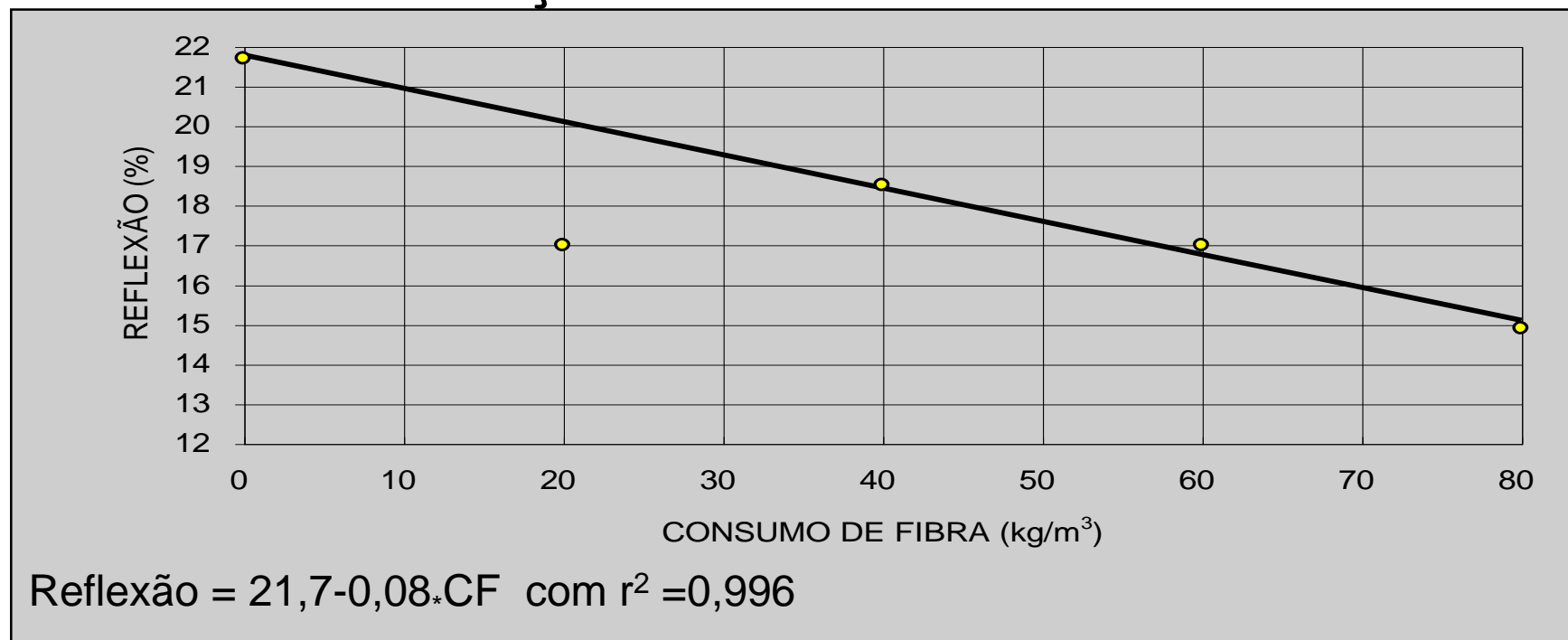
Vantagens do CPRFA em túneis

- A durabilidade do revestimento pode ser maior com fibras devido:
 - redução da fissuração.
 - fibra é um elemento descontínuo e muito menos sujeito à corrosão eletrolítica do que as barras contínuas das telas ou cambotas.

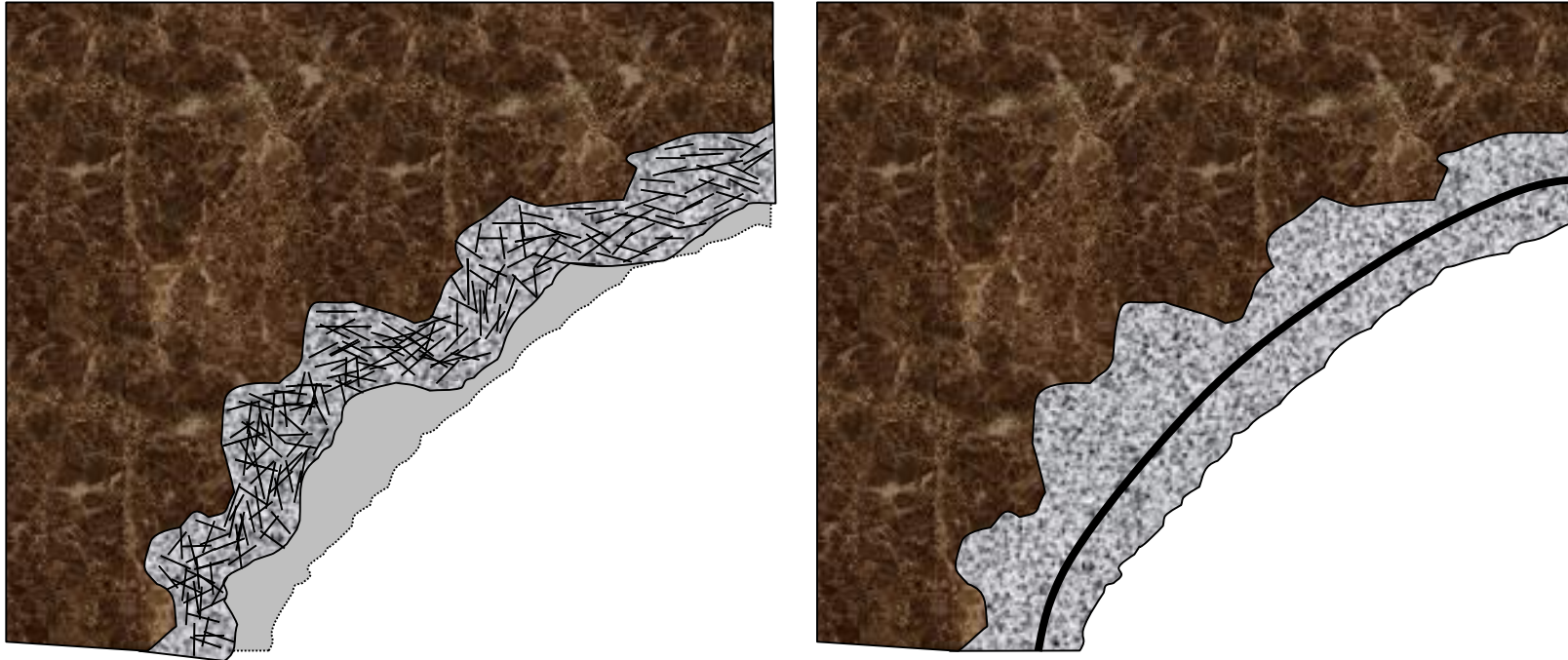
Vantagens do CPRFA em túneis

Redução da reflexão

- eliminação da tela
- eliminação de irregularidades
- maior umidificação



Concreto projetado com fibras para túneis



Concreto projetado reforçado com fibras:
Evita o volume excedente de preenchimento que ocorre
com o uso de tela metálica

Grandes desvantagens do CPRFA

Reflexão da própria fibra:

- Na via seca pode-se perder até 50% das fibras.
- Pior com a fibra de pp.
- Via úmida produz melhores resultados (para qualquer fibra).

Nem tudo é vantagem

- Frente parcializada: difícil demolição
- Material na estrutura \neq material na placa \neq material moldado
- **Pré-qualificação do material = pré-qualificação do processo de projeção**



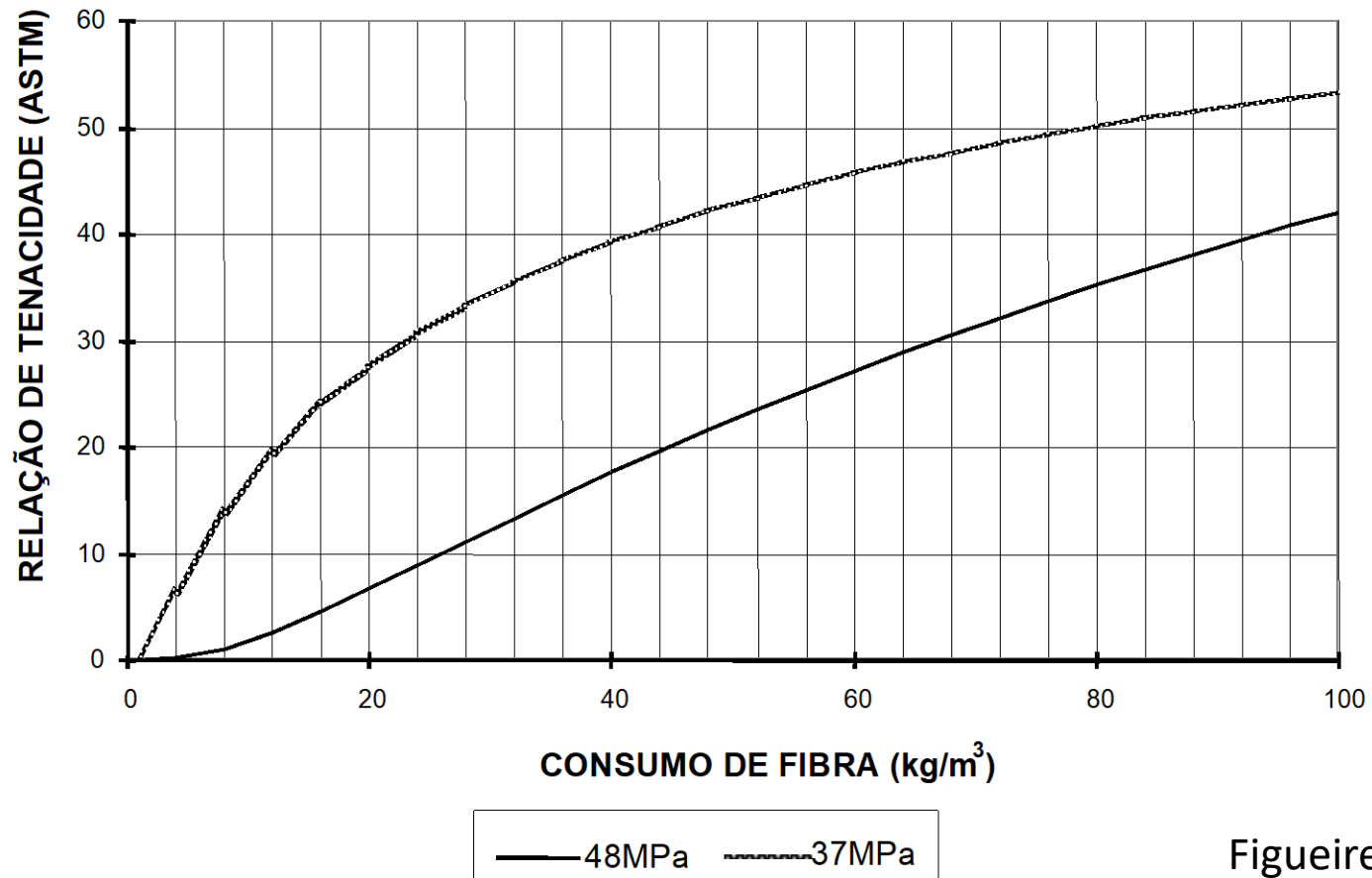
<http://www.metro.sp.gov.br/tecnologia/construcao/subterraneo/tesubterraneo.shtml>

DOSAGEM

É comum se fixar traços ∇ matriz e fibras (MEHTA e MONTEIRO, 1994; MORGAN, 1995).

ACI, 1988 referenciando a ASTM C1018 ignoram a influência das características da matriz (JOHNSTON e GRAY, 1986).

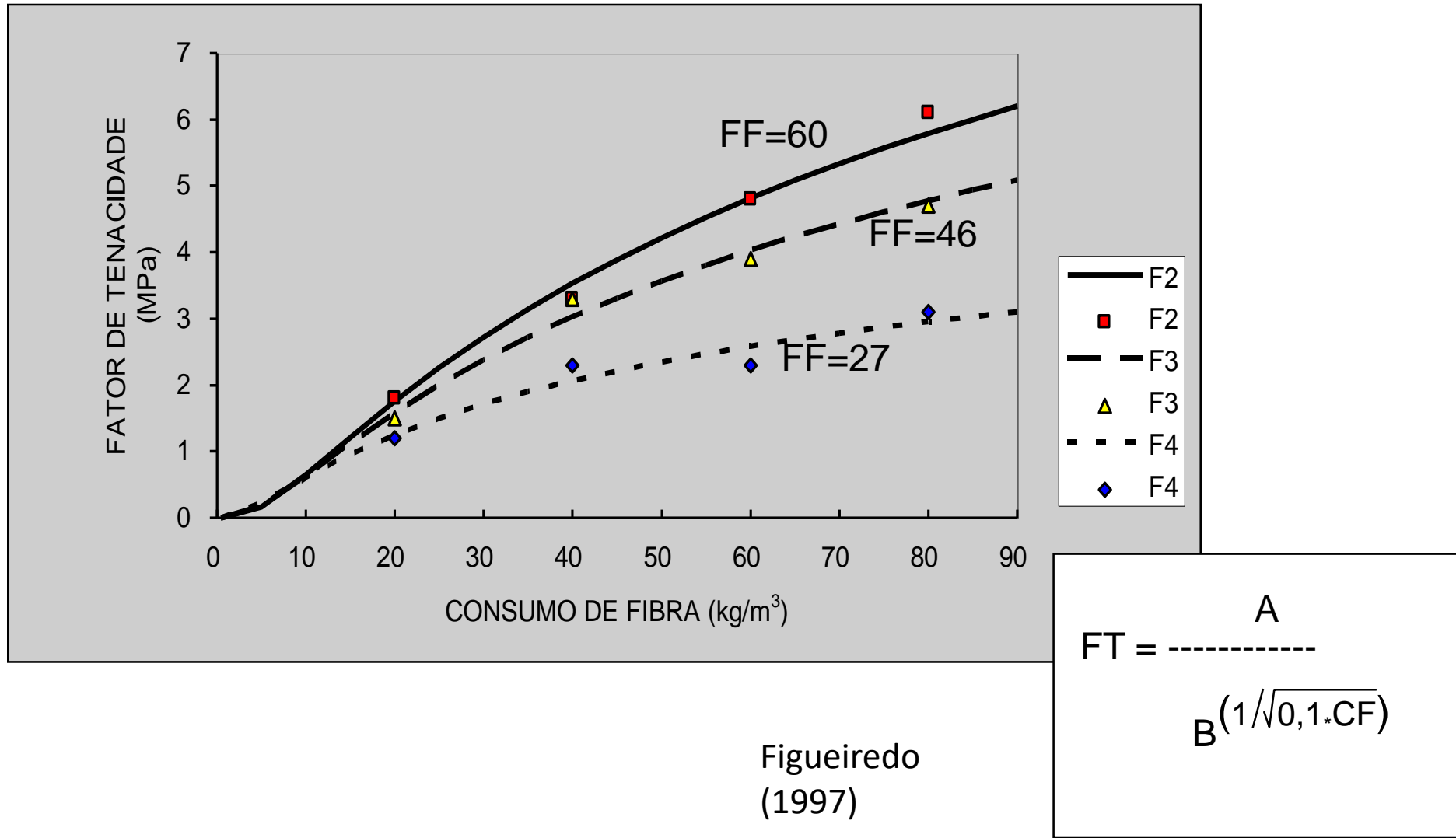
Há influência da matriz?



Figueiredo
(1997)

Há como dosar a fibra?

Correlação exponencial para os fatores JSCE-SF4



O CPRF deve atuar como material estrutural

- **Primeiramente:** não há normas brasileiras de projeto estrutural e controle de qualidade no Brasil focando o CRF em geral
- Horizonte promissor: **Novo Código Modelo *fib***
- Adoção do modelo pela ABECE (2013)
- Não dá para aplicar ao concreto projetado diretamente.
- Há como adaptar a “filosofia”.

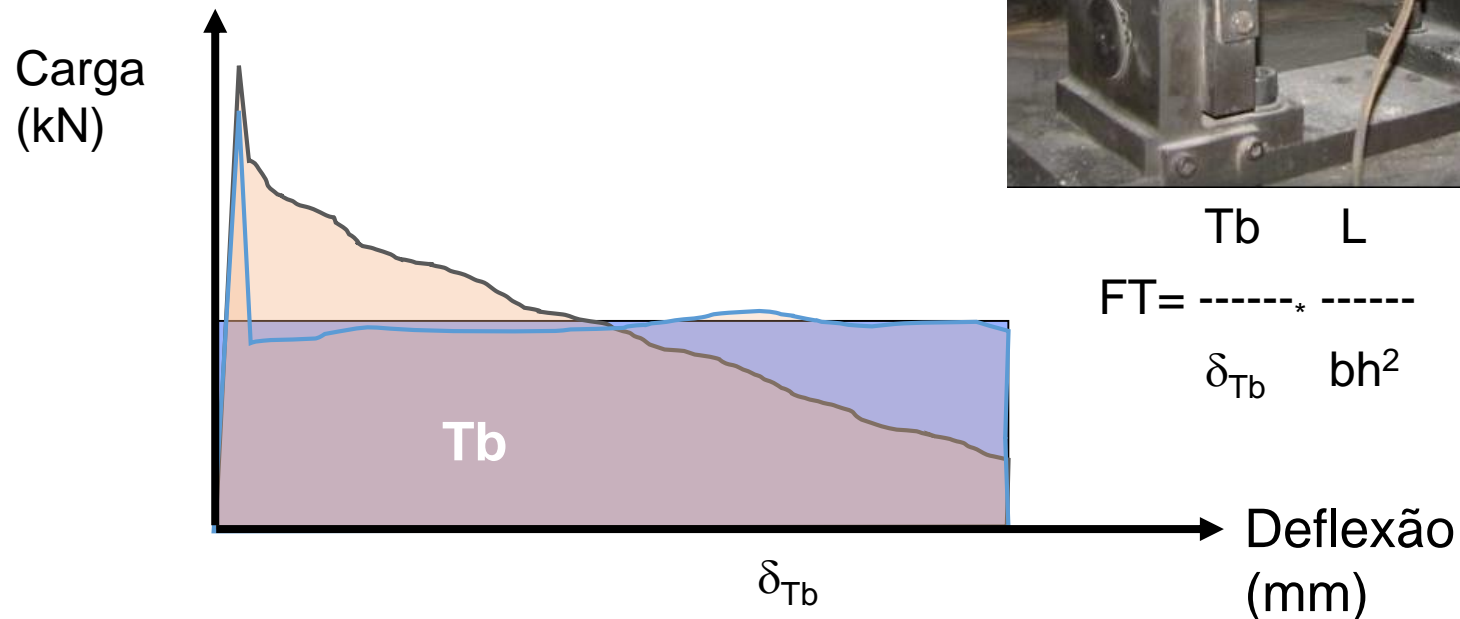
Controle específico do CPRF

- Necessariamente moldam-se placas e extraem-se testemunhos prismáticos das placas.
- Não há avaliação das estruturas (ato de fé que o parâmetro da placa é representativo da estrutura)



Controle tradicional JSCE-SF4 (1984)

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



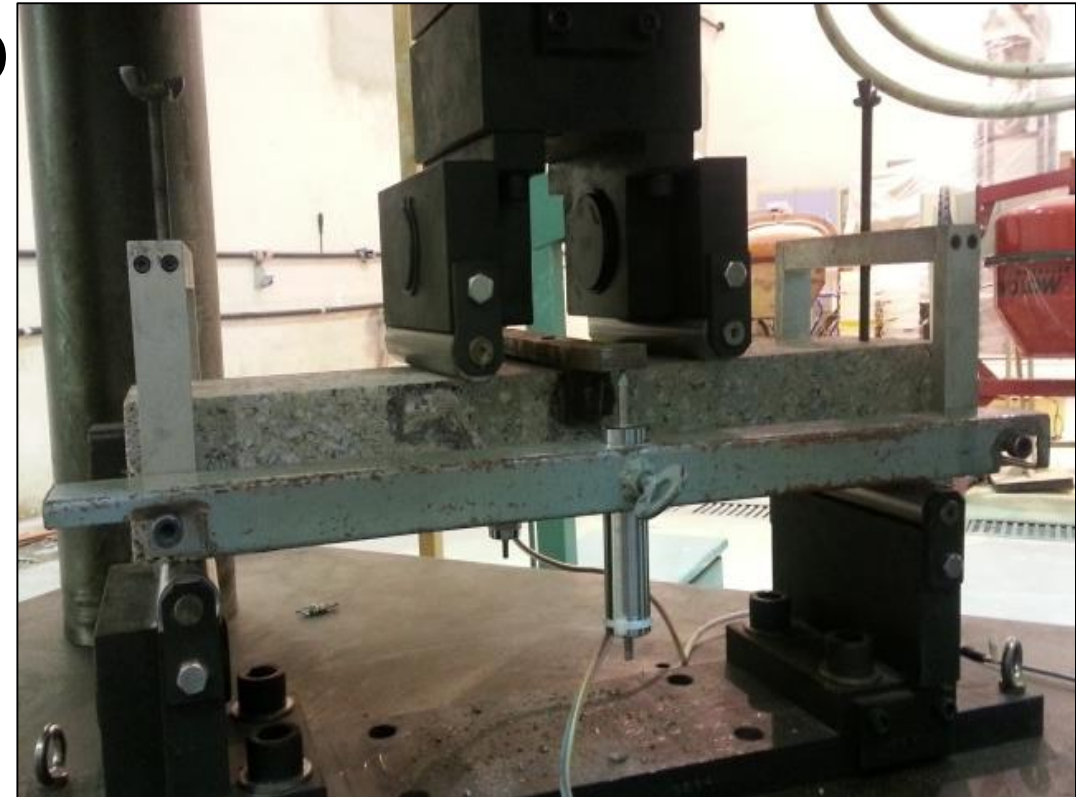
EFNARC: controle em placas e prismas cortados de placas moldadas



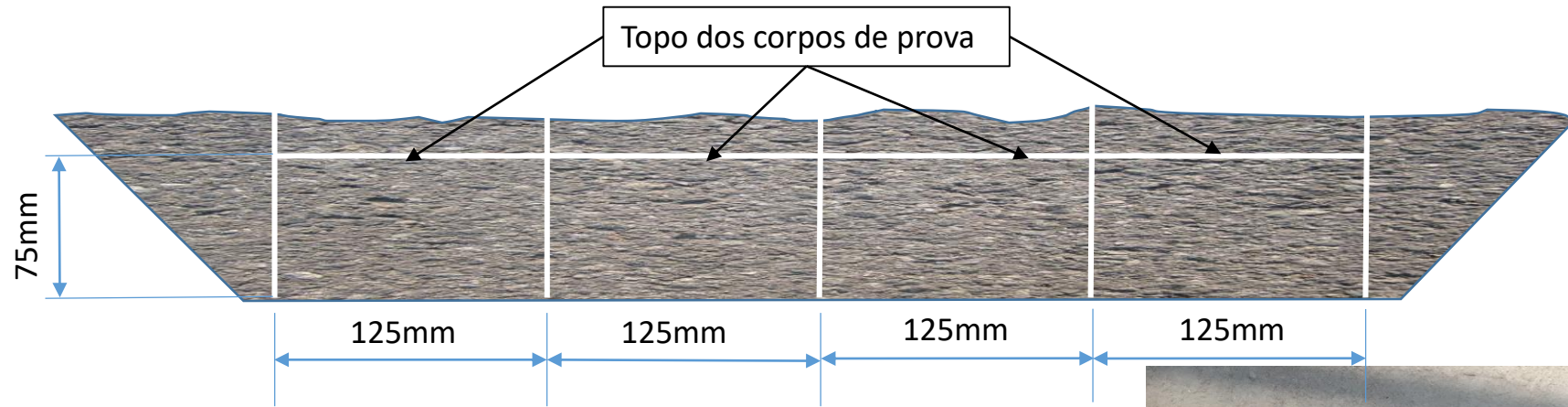
Requisitos mínimos de desempenho: **Reforço de fibras**

Resistência residual na flexão

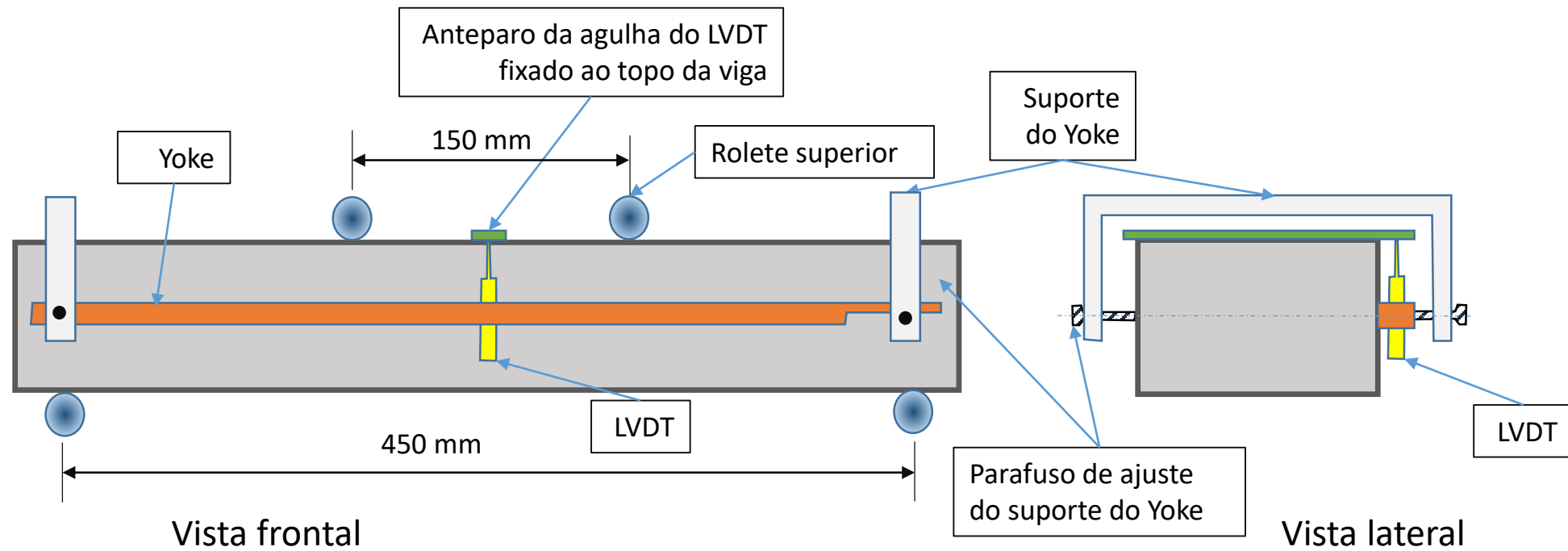
- O ensaio descrito no Anexo C em CPs preparados a partir de testemunhos extraídos de placas (Anexo B).
- Equivalente ao recomendado pela EFNARC (1996) e norma europeia EN14488-3:2006.



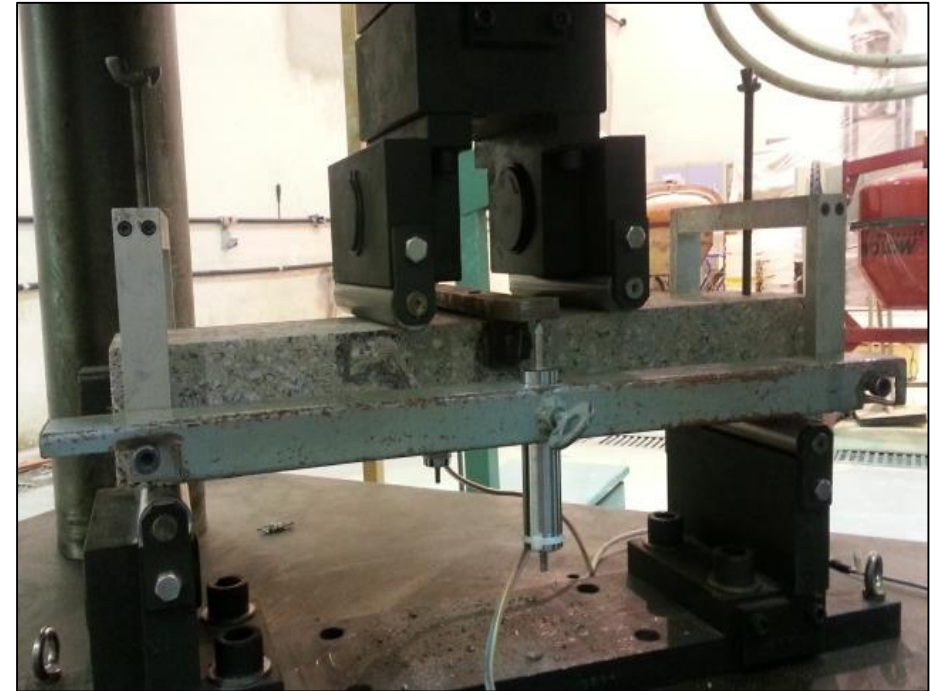
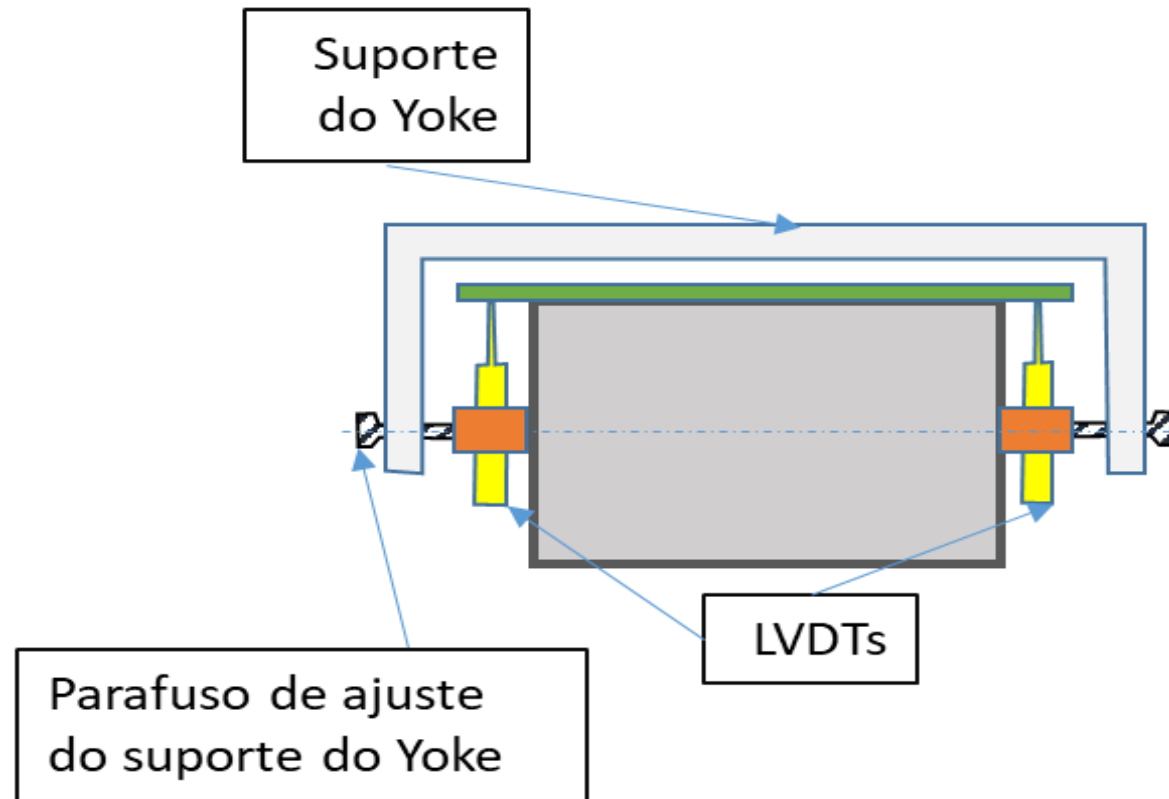
Resistência á tração e residual na flexão



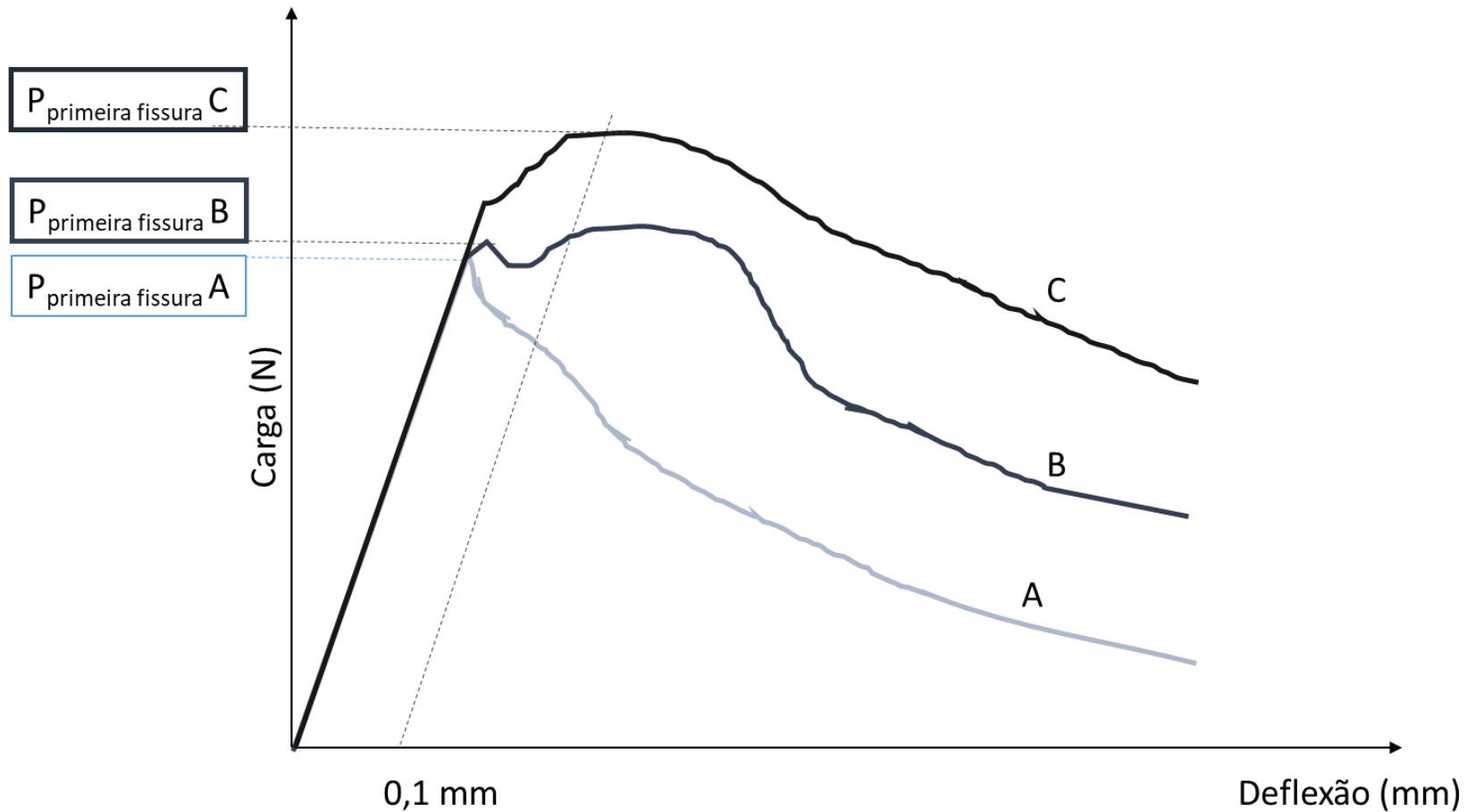
Resistência á tração e residual na flexão



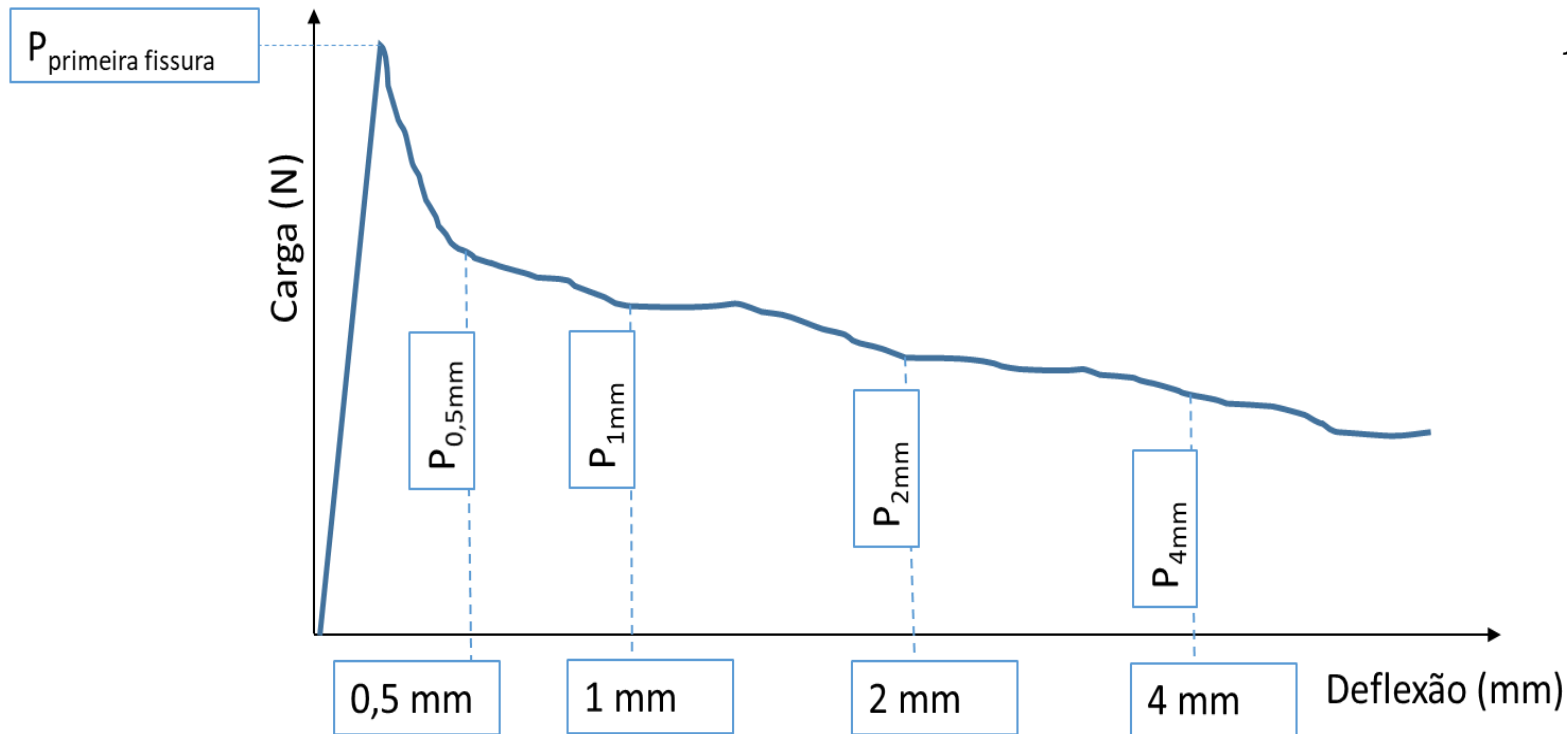
Resistência á tração e residual na flexão



Resistência á tração na flexão



Resistência residual na flexão: classes de resistência



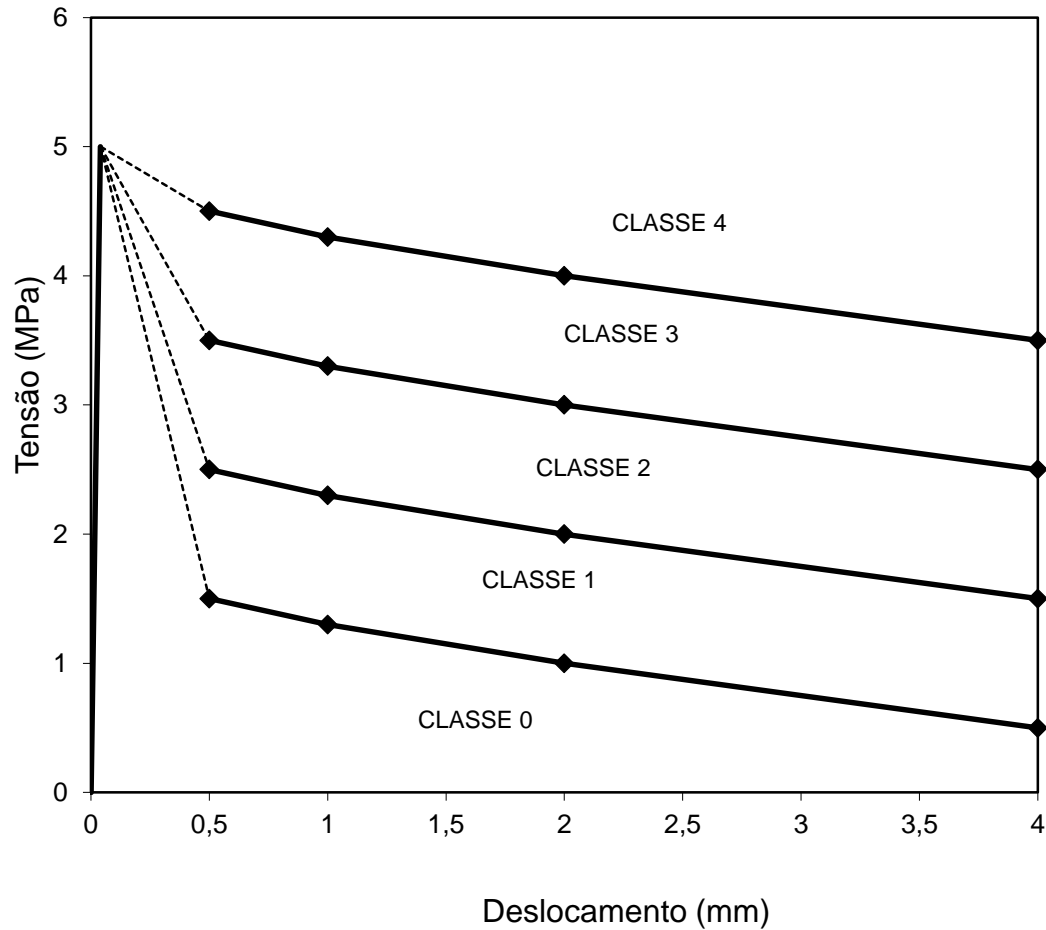
$$f e_{0,5\text{mm}}^i = P_{0,5\text{mm}}^i * \frac{L}{b^i * (h^i)^2}$$

$$f e_{1\text{mm}}^i = P_{1\text{mm}}^i * \frac{L}{b^i * (h^i)^2}$$

$$f e_{2\text{mm}}^i = P_{2\text{mm}}^i * \frac{L}{b^i * (h^i)^2}$$

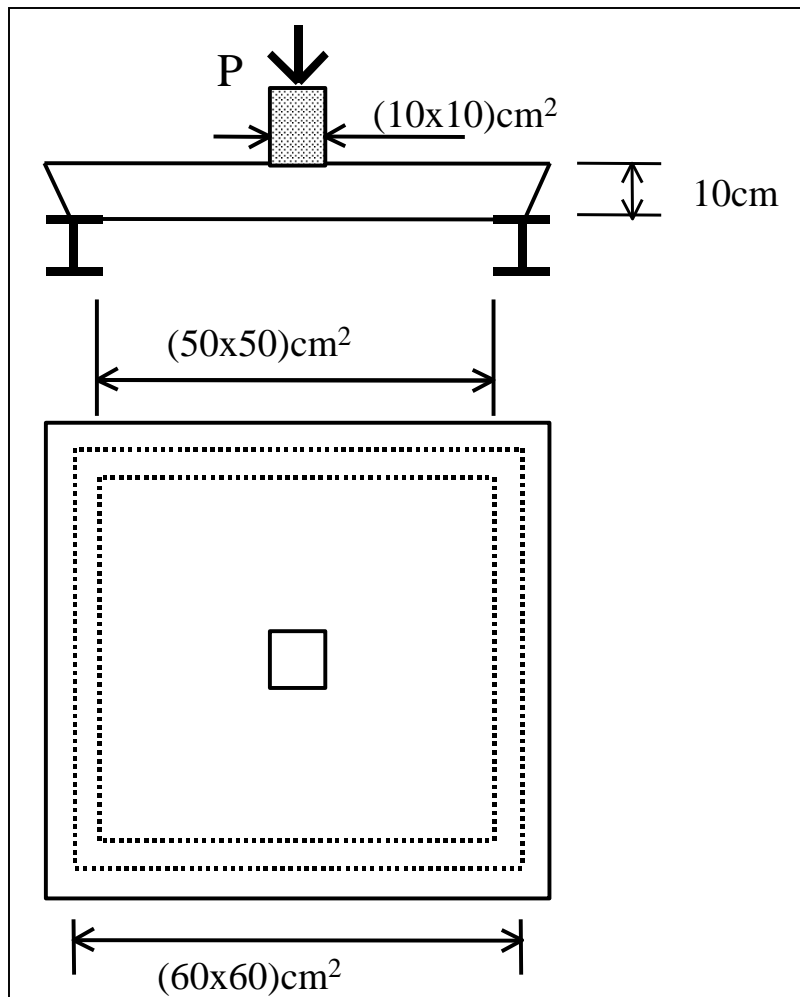
$$f e_{4\text{mm}}^i = P_{4\text{mm}}^i * \frac{L}{b^i * (h^i)^2}$$

Resistência residual na flexão: classes de resistência (EFNARC)



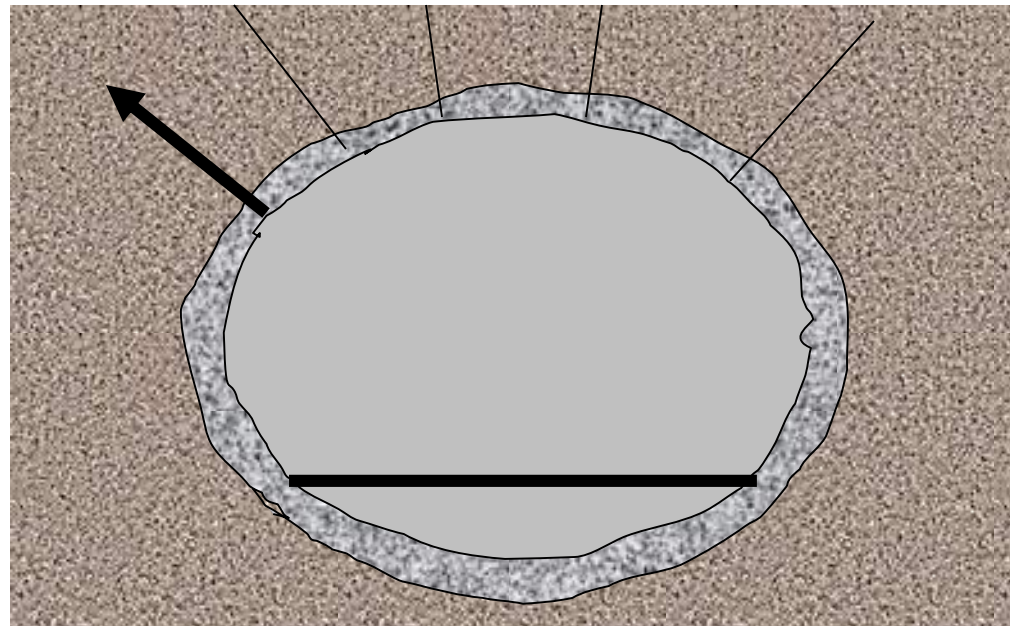
Classe de deformação	Deformação do corpo-de-prova (mm)	Resistência residual por classe (MPa)			
		Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Inicial	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5
Baixa	1	1,3	2,3	3,3	4,3
Normal	2	1	2	3	4
Alta	4	0,5	1,5	2,5	3,5

Ensaio de punção de placas



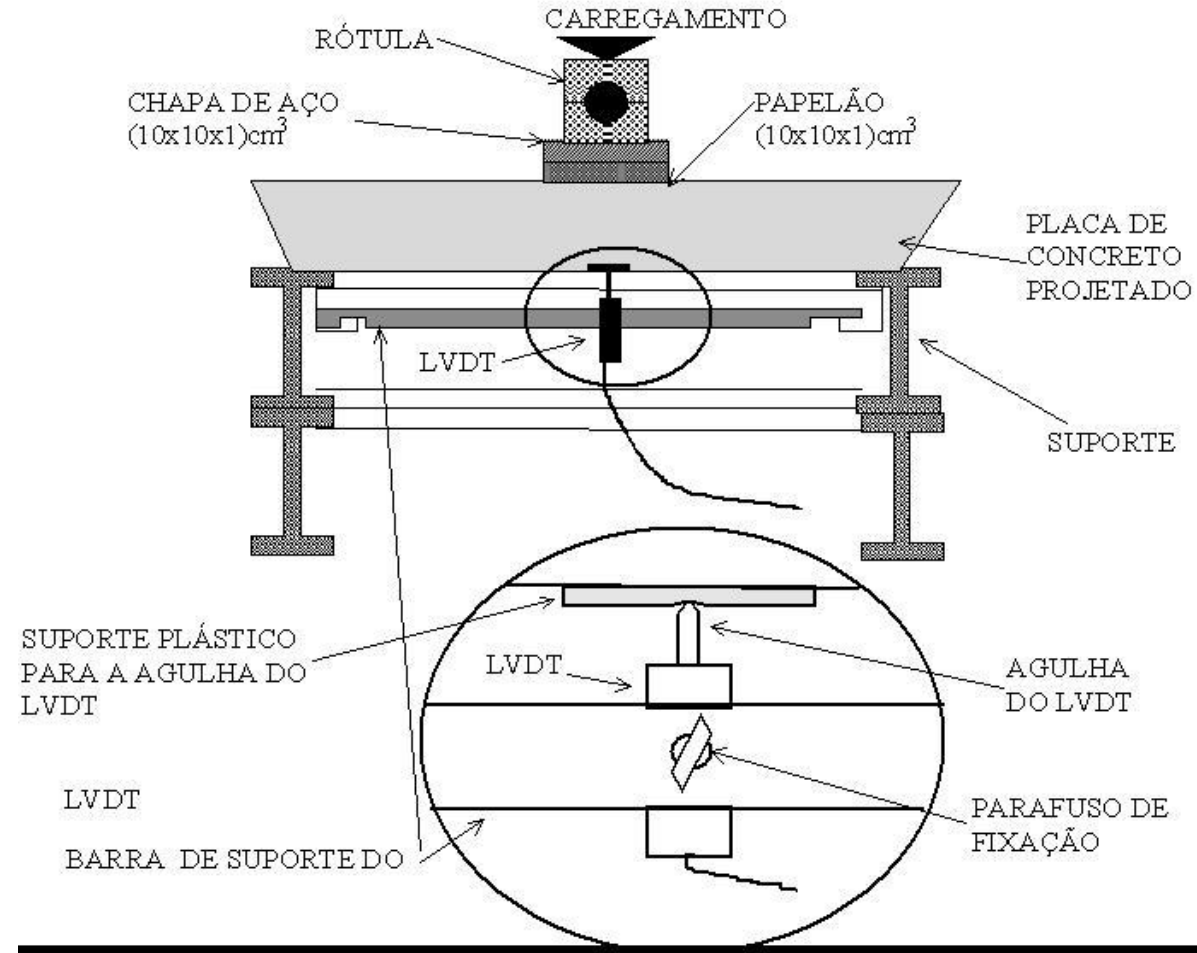
Representa o esforço de um tirante

Permite comparação entre fibras e telas metálicas



Ensaio de punção de placas

Sistema para melhorar a precisão



Ensaio de punção de placas

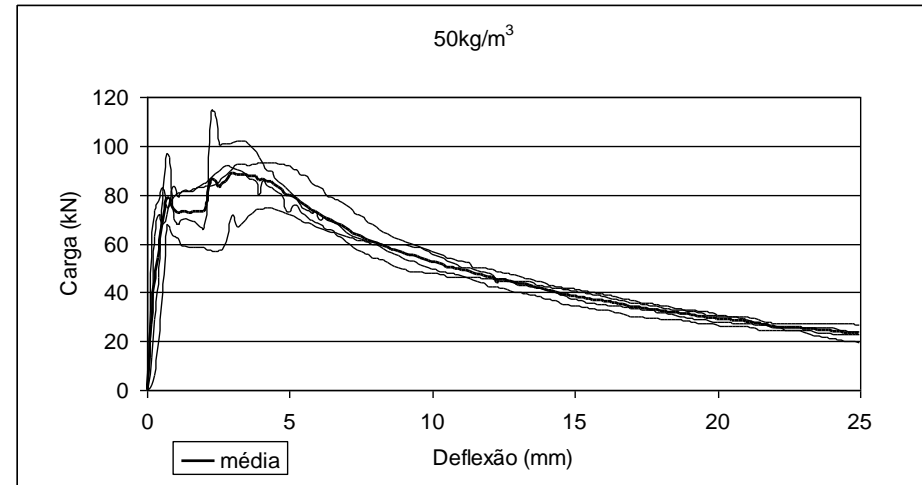
Grandes níveis de deslocamento geram grandes aberturas de fissuras e alterações da condição de apoio: grande variabilidade em geral.



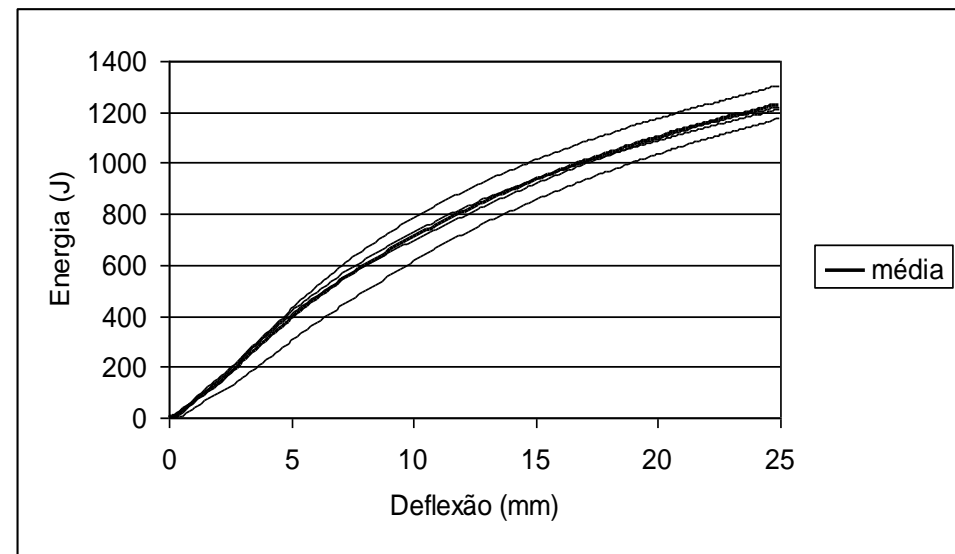
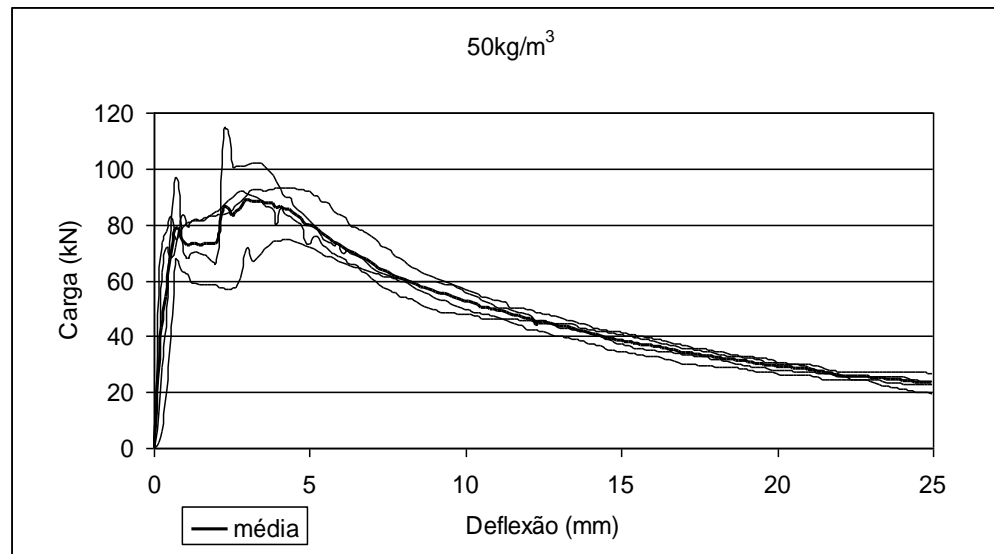
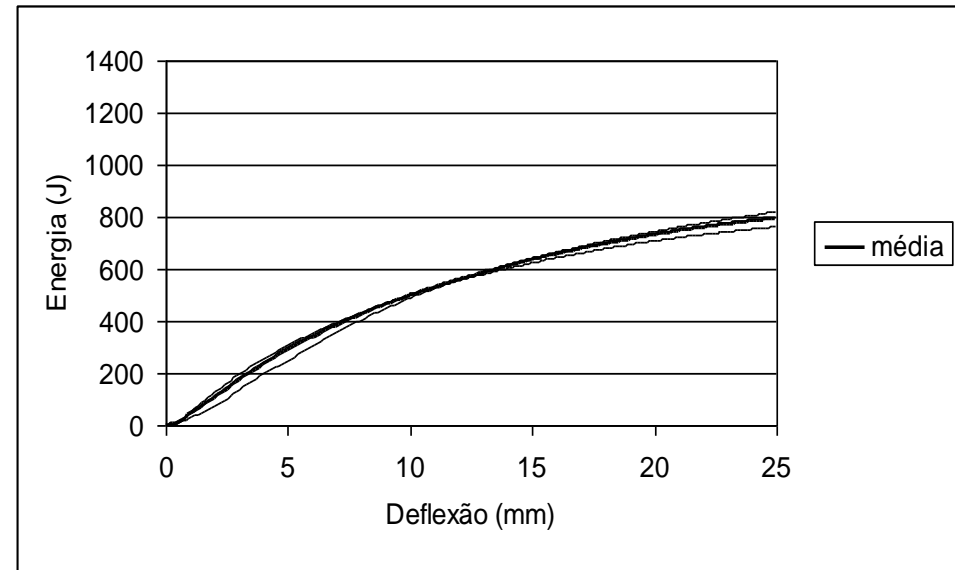
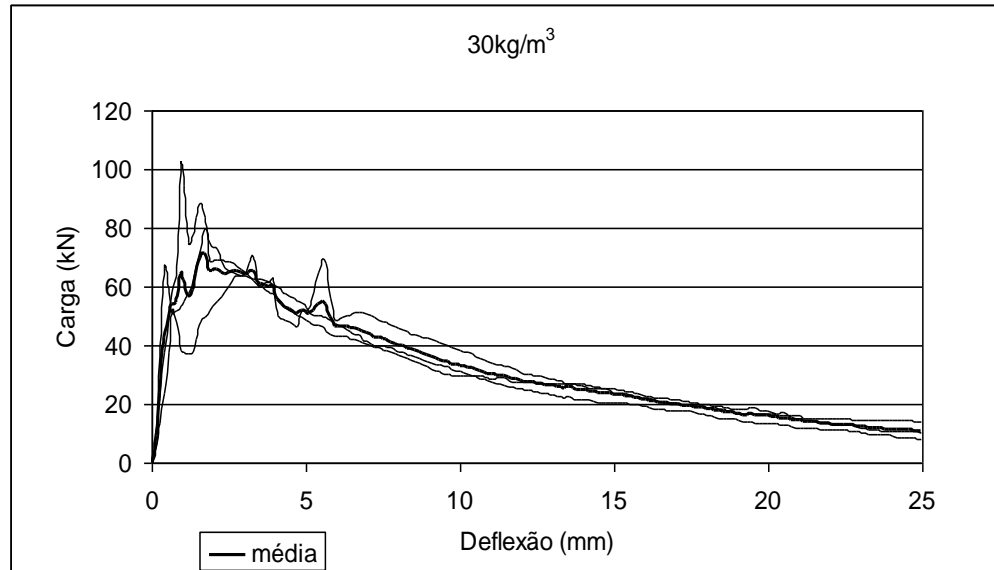
Absorção de energia

- Caráter totalmente empírico!

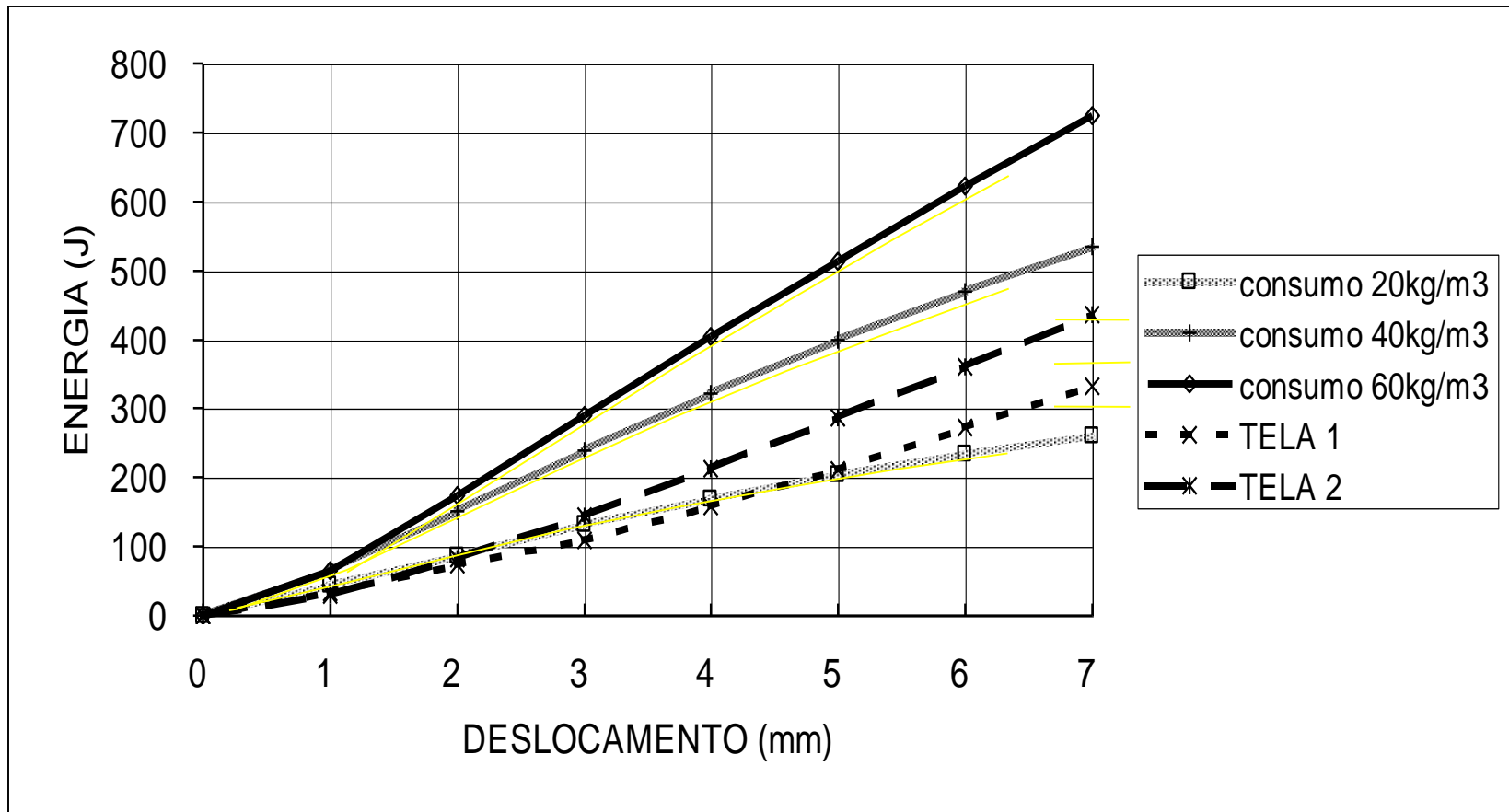
Nível (EFNARC)	Energia absorvida (J)
A	500
B	700
C	1000



Ensaio de punção de placas

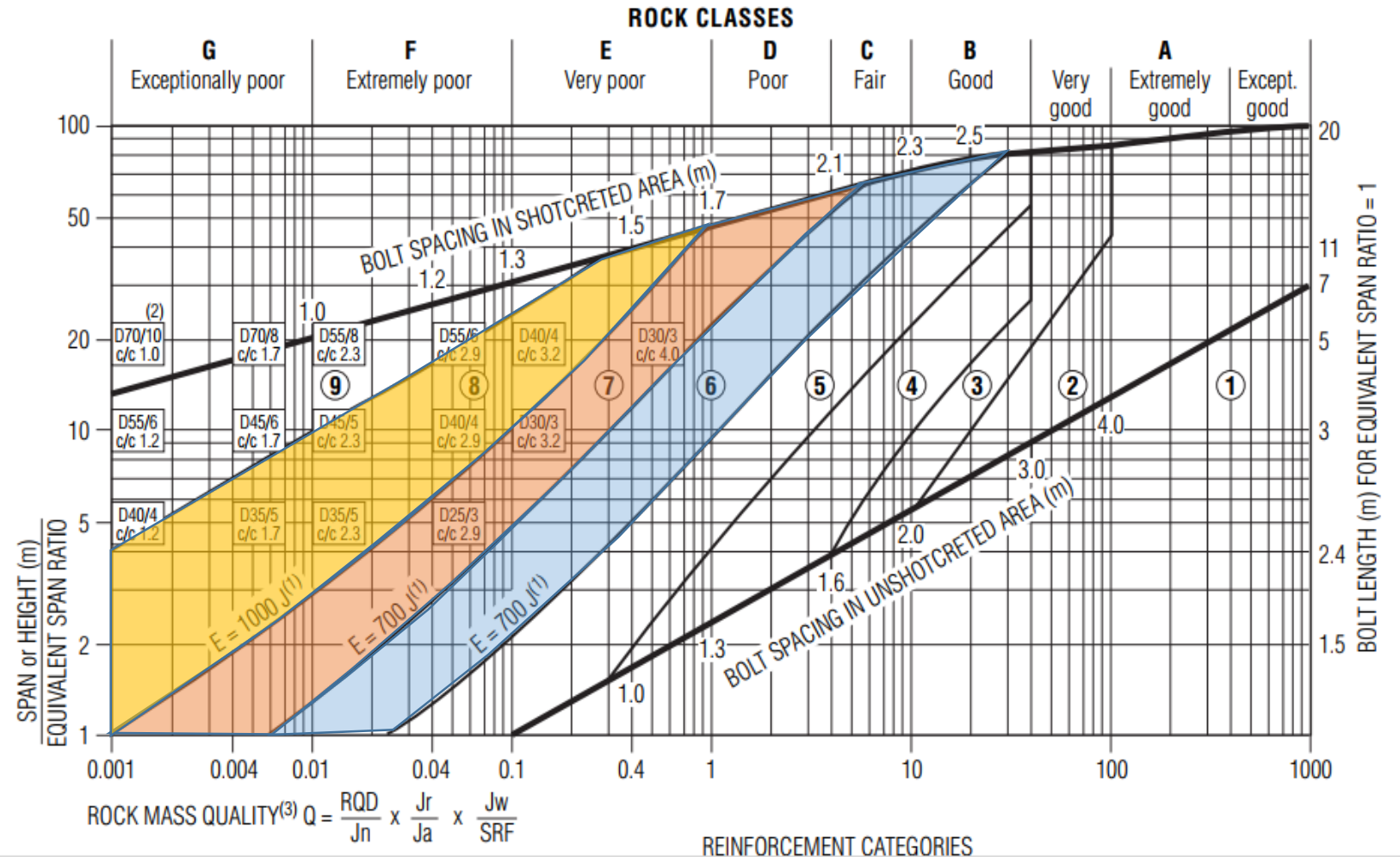


Exemplo FIBRA vs. TELA

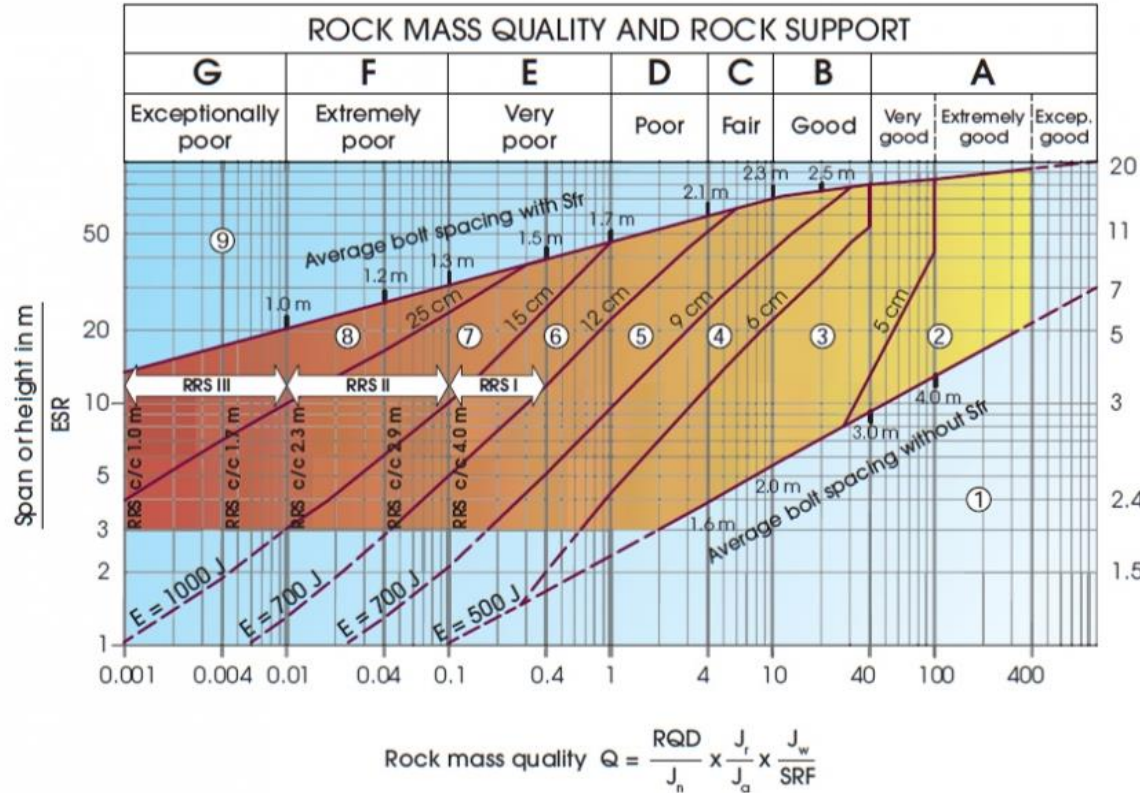


Absorção de energia: ensaio de punção de placas

- O projetista deve definir os níveis de absorção de energia mínimos a serem especificados para o CPRF.
- Referência sugerida



Absorção de energia: ensaio de punção de placas



Support categories

- ① Unsupported or spot bolting
- ② Spot bolting, **SB**
- ③ Systematic bolting, fibre reinforced sprayed concrete, 5-6 cm, **B+Sfr**
- ④ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 6-9 cm, **Sfr (E500)+B**
- ⑤ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 9-12 cm, **Sfr (E700)+B**
- ⑥ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 12-15 cm + reinforced ribs of sprayed concrete and bolting, **Sfr (E700)+RRS I+B**
- ⑦ Fibre reinforced sprayed concrete >15 cm + reinforced ribs of sprayed concrete and bolting, **Sfr (E1000)+RRS II+B**
- ⑧ Cast concrete lining, **CCA** or **Sfr (E1000)+RRS III+B**
- ⑨ Special evaluation

Bolts spacing is mainly based on Ø20 mm

E = Energy absorption in fibre reinforced sprayed concrete

ESR = Excavation Support Ratio

Areas with dashed lines have no empirical data

RRS - spacing related to Q-value

- RRS I: Si30/6 Ø16 - Ø20 (span 10m)
- RRS II: D40/6+2 Ø16-20 (span 20m)
- RRS III: Si35/6 Ø16-20 (span 5m)
- RRS IV: D45/6+2 Ø16-20 (span 10m)
- RRS V: D55/6+4 Ø20 (span 20m)
- RRS VI: D40/6+4 Ø16-20 (span 5 m)
- RRS VII: D55/6+4 Ø20 (span 10 m)
- RRS VIII: D70/6+6 Ø20 (span 20 m)

Si30/6 = Single layer of 6 rebars, 30 cm thickness of sprayed concrete

D = Double layer of rebars

Ø16 = Rebar diameter is 16 mm

c/c = RSS spacing, centre - centre

Gráfico do Q-system para revestimentos de maciços, desenvolvido por Norwegian Geotechnical Institute (NGI) (reproduzido por (NGI, 2014))

Australian Shotcrete Society, através do Concrete Institute of Australia (2010).

Alternativas de ensaio de placa

ASTM C1550:2005

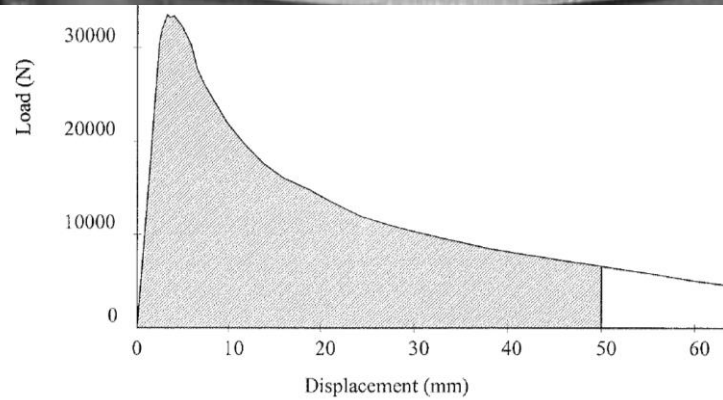
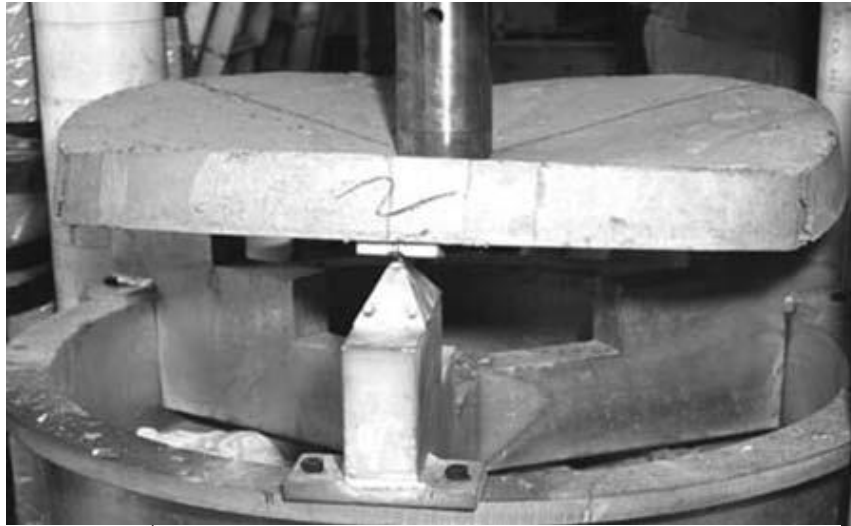
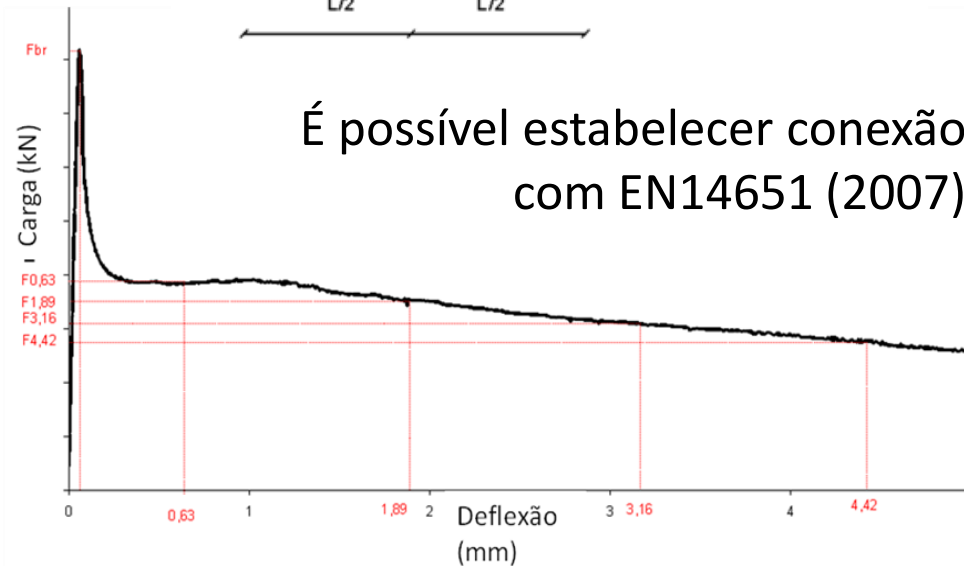
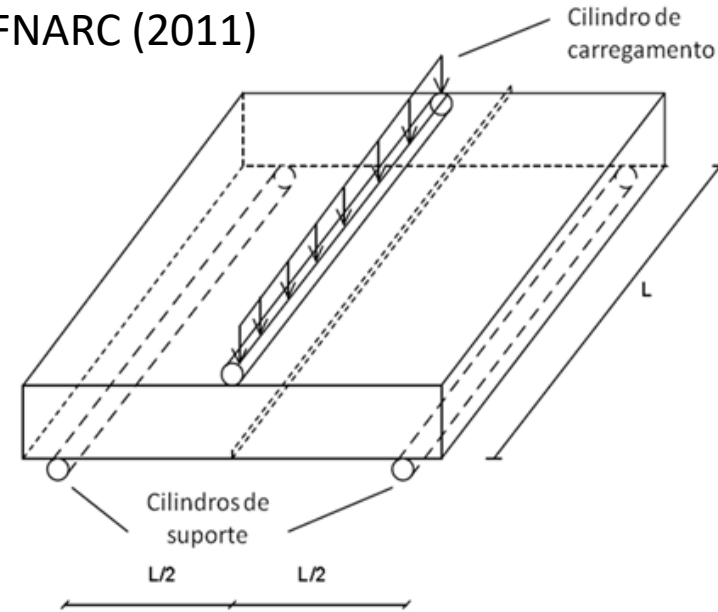


Figure 3.11 – The area under a typical load-displacement curve in an RD panel.

Vinh (2003)

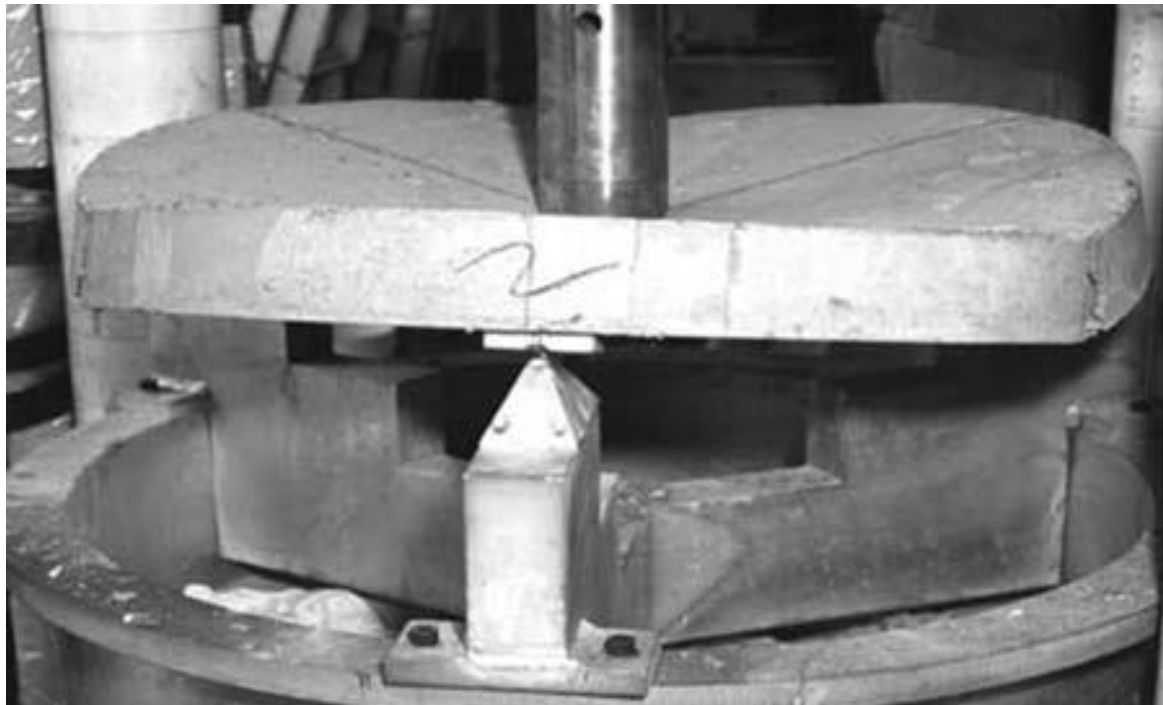
EFNARC (2011)



É possível estabelecer conexão com EN14651 (2007)

Absorção de energia: ensaio de punção de placas

- No caso de haver capacitação laboratorial disponível, o método de ensaio a ser preferencialmente utilizado para a determinação do nível de absorção de energia é o ASTM C1550:2005.
 - Os níveis de absorção de energia equivalentes:



Classe de absorção de energia	Absorção de energia em Joule para uma deflexão de 25 mm.	Absorção de energia em Joule ASTM C1550:2005
A	500	200
B	700	280
C	1000	400

Novas análises:

- Trabalho em desenvolvimento com César Luiz Silva (2016) e Isaac Galobardes:
- Uso do ensaio Barcelona conjugado ao ensaio indutivo para caracterização do concreto projetado reforçado com fibras de aço.

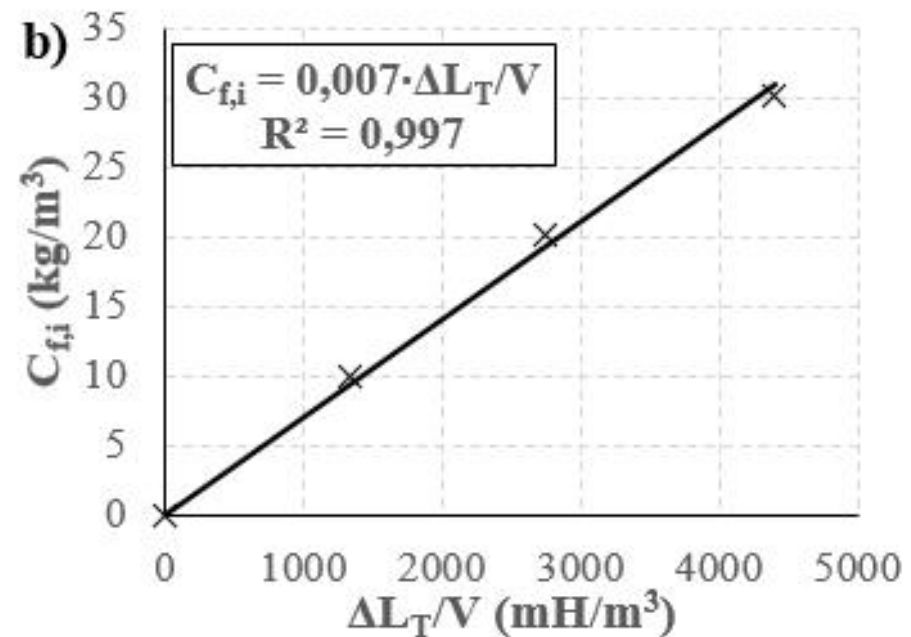
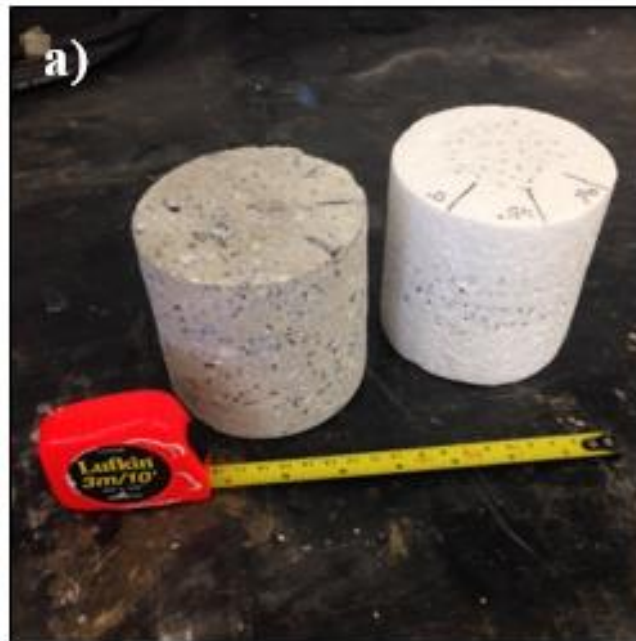


Alternativa para controlar o teor de fibras de aço no concreto projetado

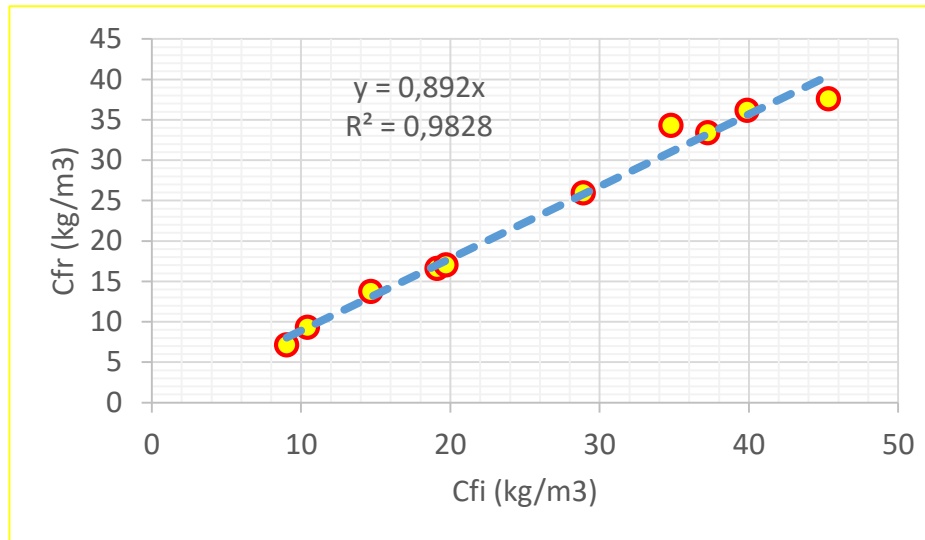
➤ Dissertação César L. Silva (2016)

- Calibração do Método indutivo

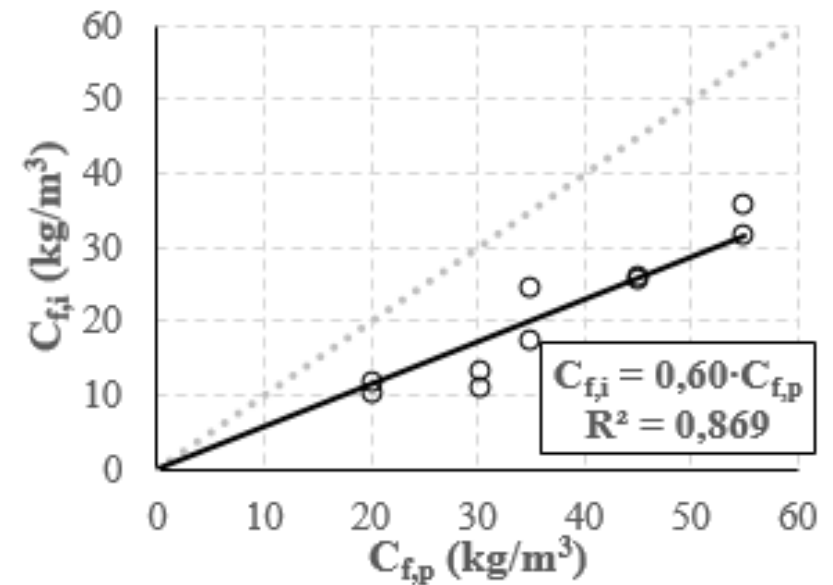
Cilindro de isopor utilizado na calibração do método indutivo a) e gráfico com a equação de calibração b)



Alternativa para controlar o teor de fibras de aço no concreto projetado



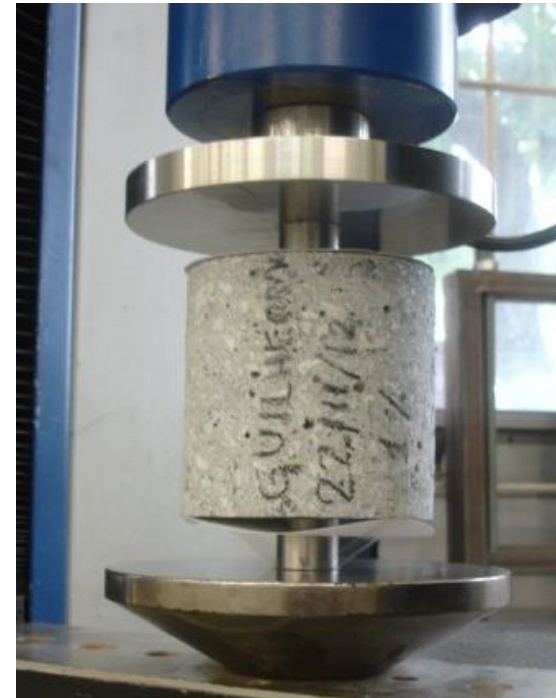
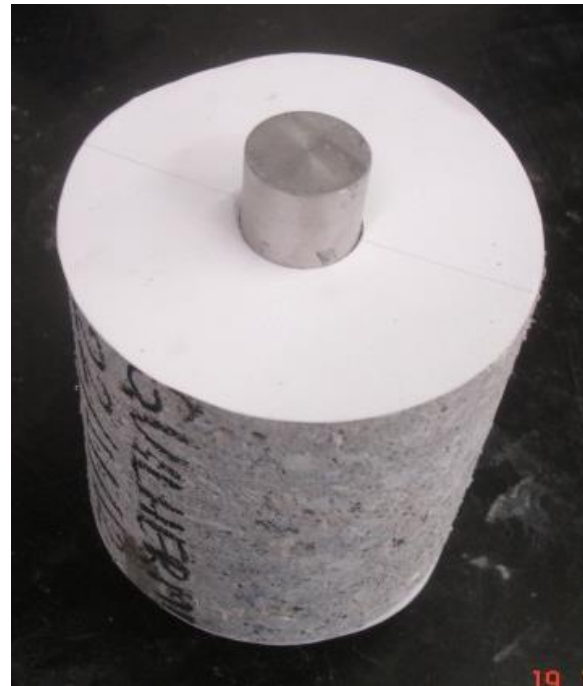
Correlação entre os teores de fibras obtidos pelo método indutivo e por reconstituição de traço



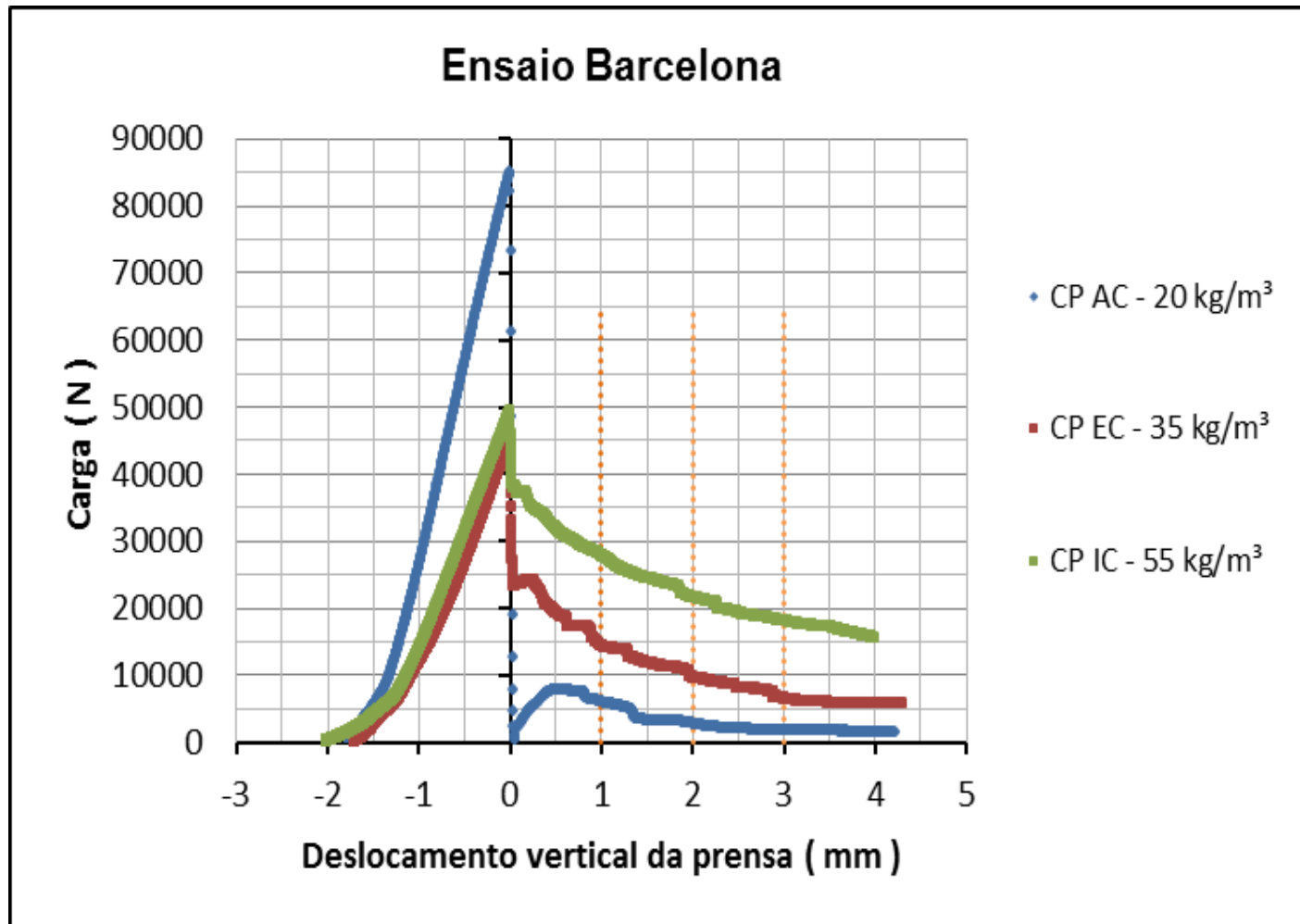
Correlação entre os teores de fibras obtidos pelo método indutivo e o teórico

Ensaio de duplo puncionamento (Barcelona)

- Para a realização do controle do CPRF também pode-se adotar o ensaio de duplo puncionamento
- IBRACON/ABECE - Controle da qualidade do concreto reforçado com fibras. CT 303.

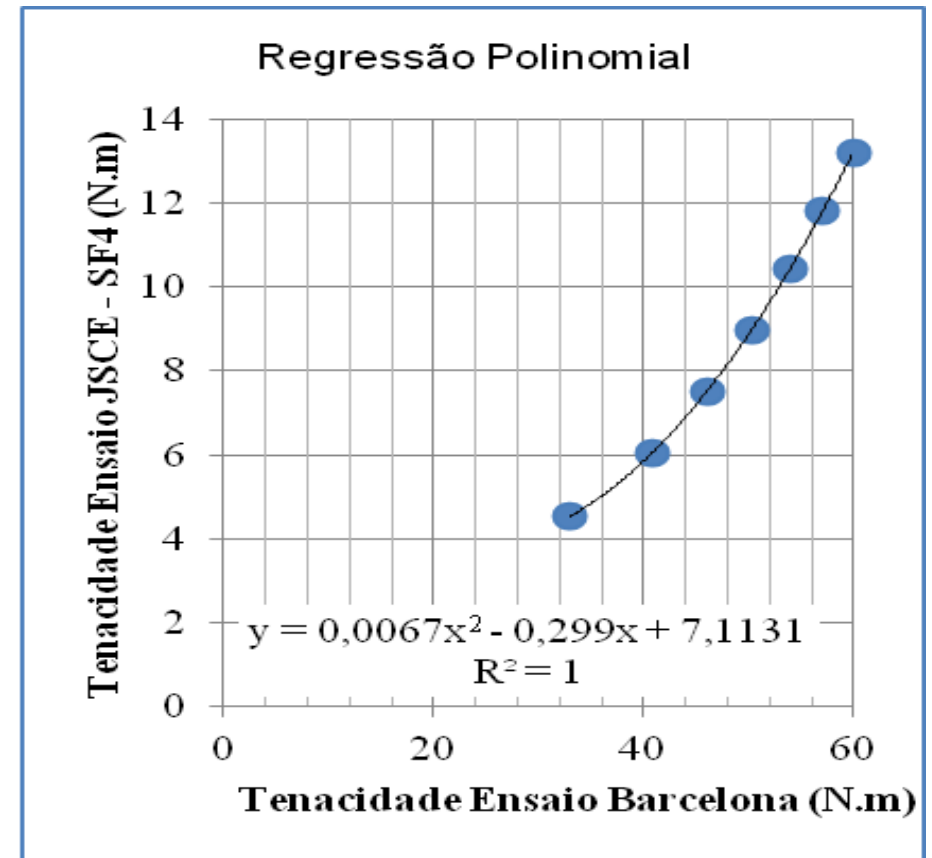


Ensaio Barcelona: resultados típicos



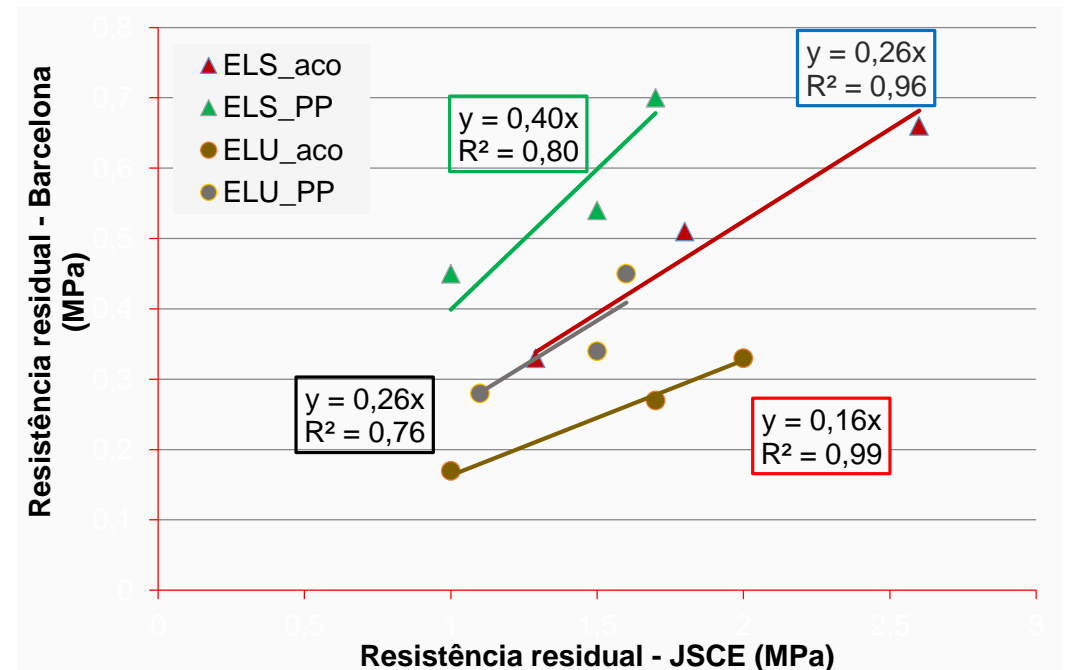
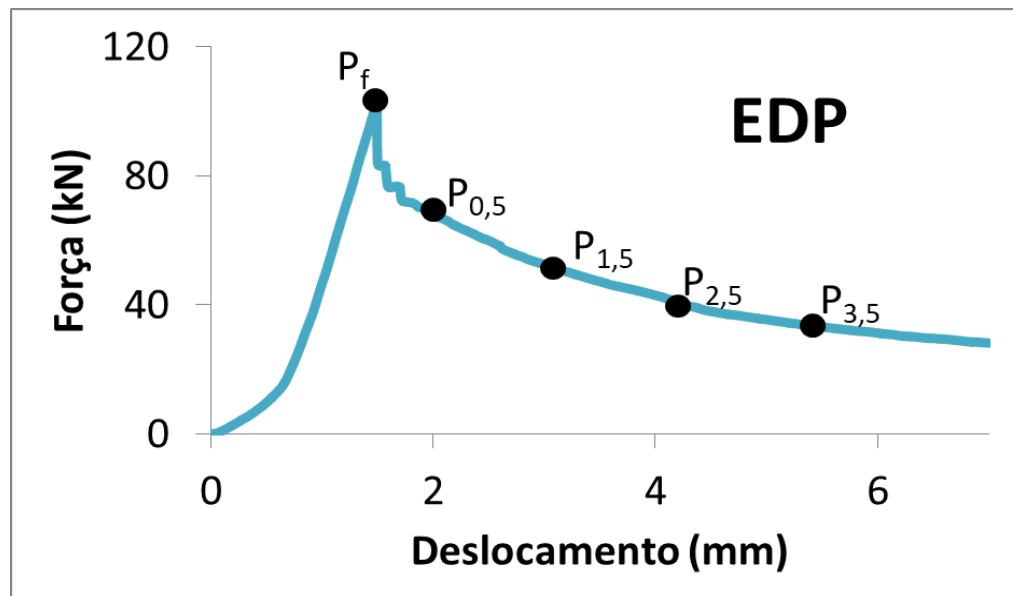
Ensaio de duplo puncionamento (Barcelona)

- 6 CPs de 10cm X 10cm, extraídos de placas ou da estrutura.
- Calibração: estudos prévios.
- Correlação também pode ser por energia

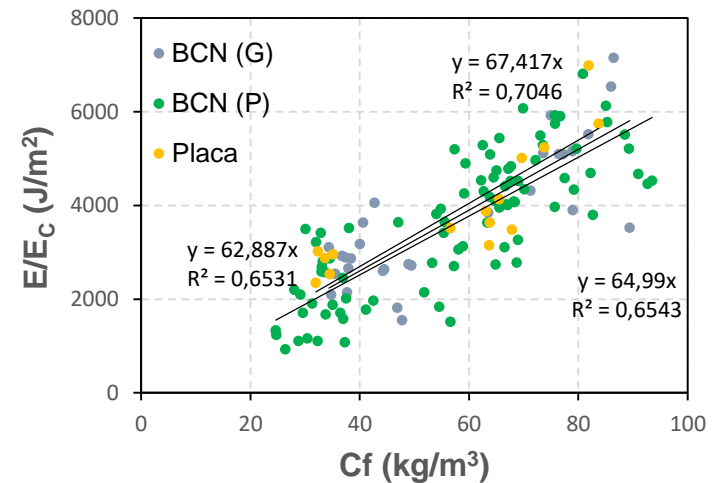
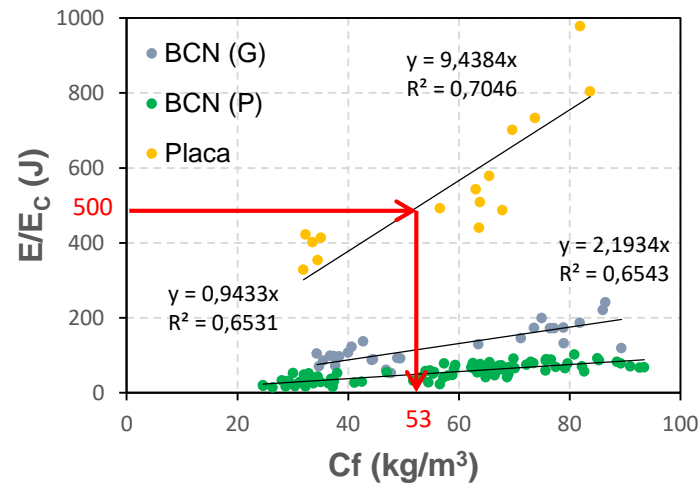


Ensaio de duplo puncionamento (Barcelona)

Toaldo et al., 2013
Monte et al., 2014



Ensaio (Barcelona) vs Punção de placa



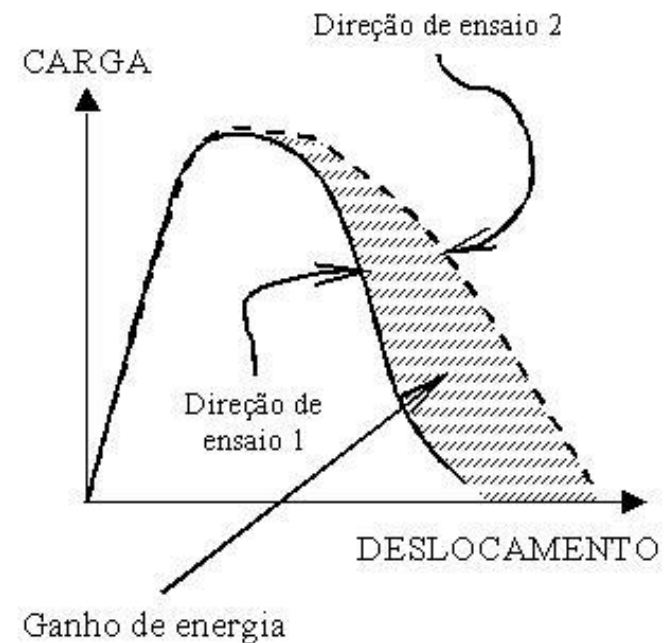
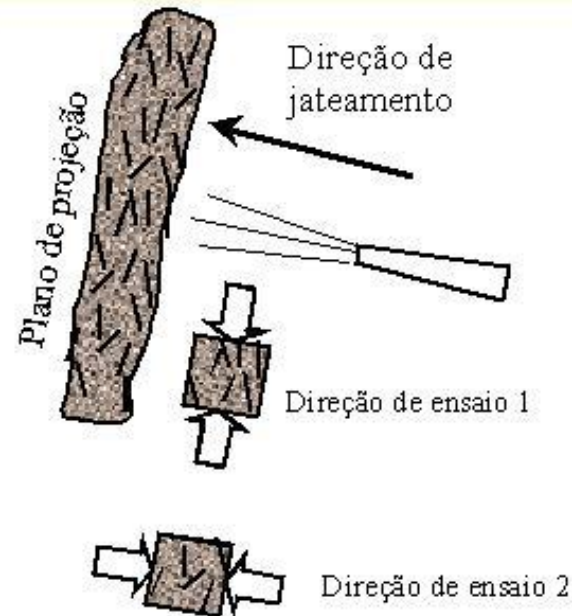
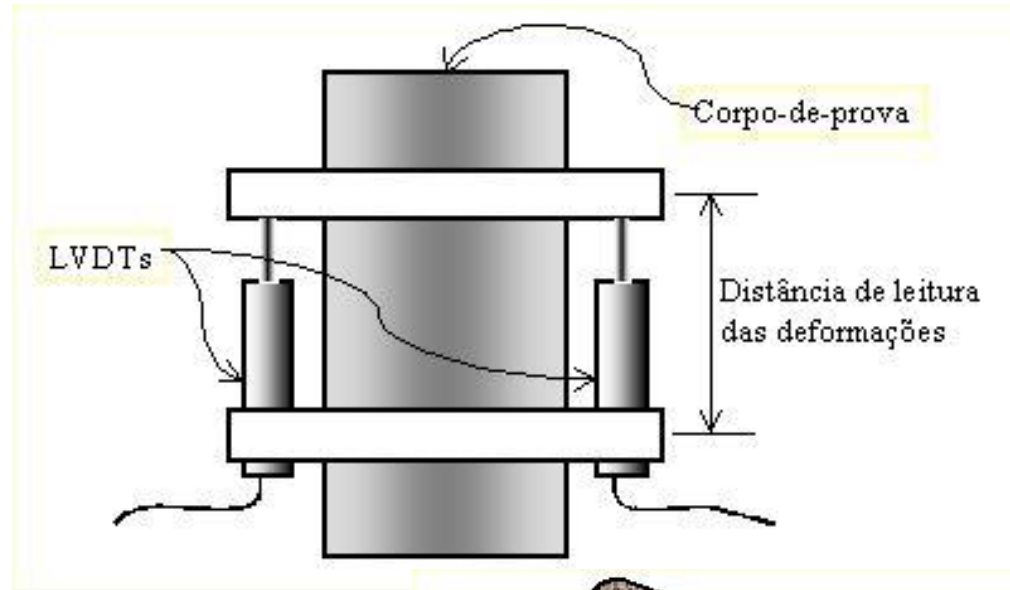
Correlação entre os resultados de absorção de energia do ensaio punção de placa quadrada EN 14488-5, e BCN em cilindros maiores (G) e menores (P), com o teor de fibra, em $J - kg/m^3$ (a) e $J/m^2 - kg/m^3$ (b).

Correlação dos níveis de energia exigidos pela norma EN 14487-1 (2005).

<i>EN14487-1</i>	<i>EN 14488-5</i>	<i>BCN (G)</i>	<i>BCN (P)</i>	
<i>Classe</i>	<i>E₂₅</i>	<i>E_{5.0}</i>	<i>E_{5.0}</i>	<i>C_f</i>
<i>E 500</i>	500	116	50	53
<i>E 700</i>	700	163	70	74
<i>E 1000</i>	1000	232	100	106

Alan Estrada
(2019)

Resistência à compressão

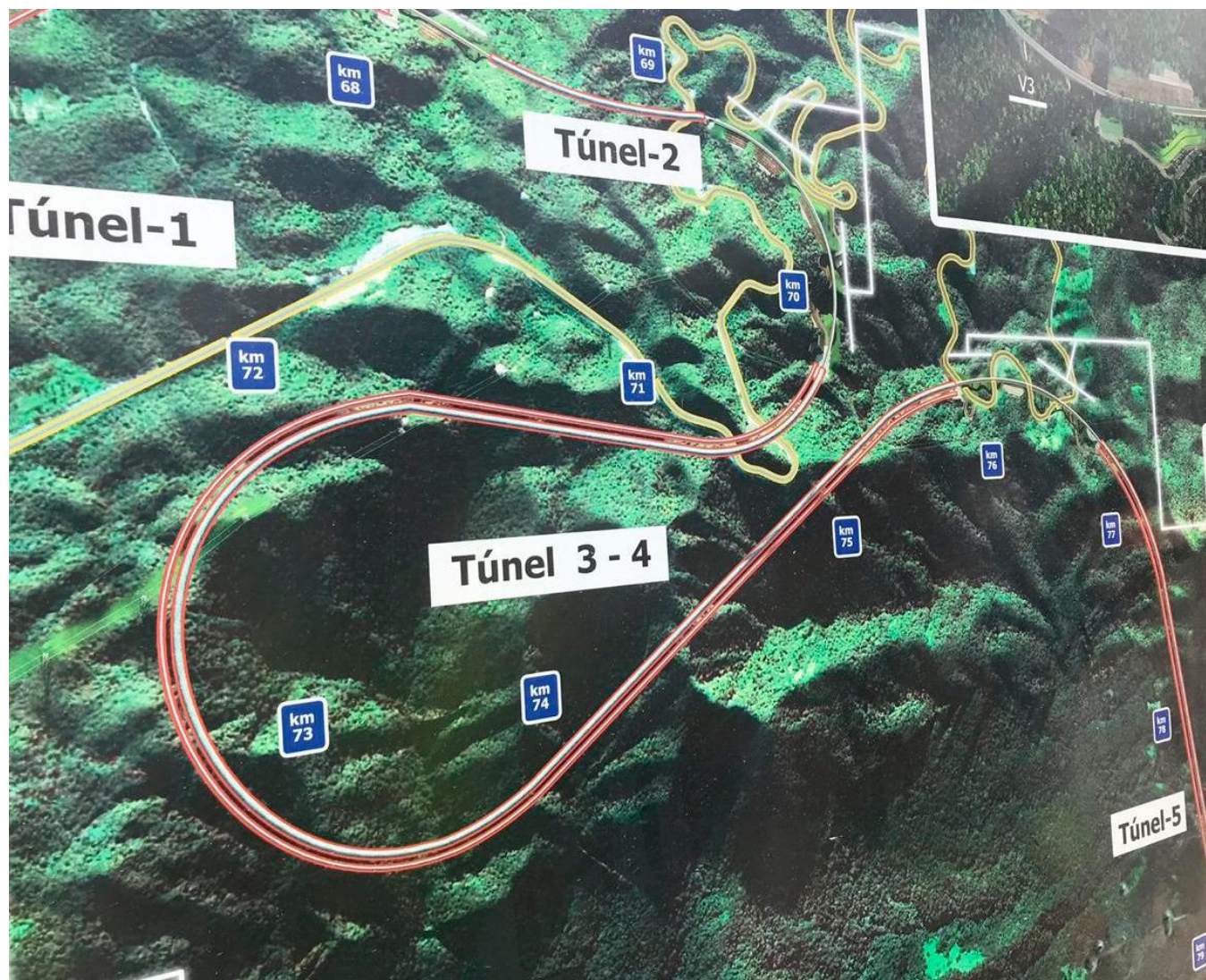


Proposta de padrão de amostragem (EFNARC, 1996)

Tipo de ensaio de controle		Área máxima em m ² de concreto produzido entre testes		
		Controle Reduzido	Controle Normal	Controle Rigoroso
Resistência à compressão nas primeiras idades (até 24 horas)		100	50	20
Resistência à compressão nas maiores idades		500	250	100
Controle do CPRF – Tipo 1	Resistência à tração na flexão		500	250
	Resistência residual na flexão		1000	500
	Absorção de energia em placas		1000	500
Controle do CPRF – Tipo 2	Ensaio de duplo puncionamento		500	250
Conteúdo incorporado de fibra			250	100
Espessura da camada projetada		50	25	10

Case: Nova Tamoios

Construção dos túneis mais longos do Brasil



Construção dos túneis mais longos do Brasil

- Túneis de serviço com acesso a cada 250 m
- Potencial utilização para duplicação



O risco do incêndio Rodovia Tamoios 18/06/19



O risco do incêndio: Rodovia Tamoios 18/11/19



Usina implantada na própria obra



Agregados para concreto projetado: todo produzido na própria obra



Revestimento primário com fibra de aço



Revestimento secundário com reforço de macrofibra de pp e microfibra de pp (spalling)



Revestimento secundário com reforço de macrofibra de pp e microfibra de pp (spalling)



Mistura no caminhão betoneira dos materiais básicos



Adição posterior de fibras de pp



Adição posterior de fibras de pp



Adição posterior de fibras de pp



Controle por abatimento



Frente de escavação



Moldagem de placas (estudo de ação de fogo)



Moldagem de placas (estudo de ação de fogo)



Pinos de controle de espessura



Chegada do concreto



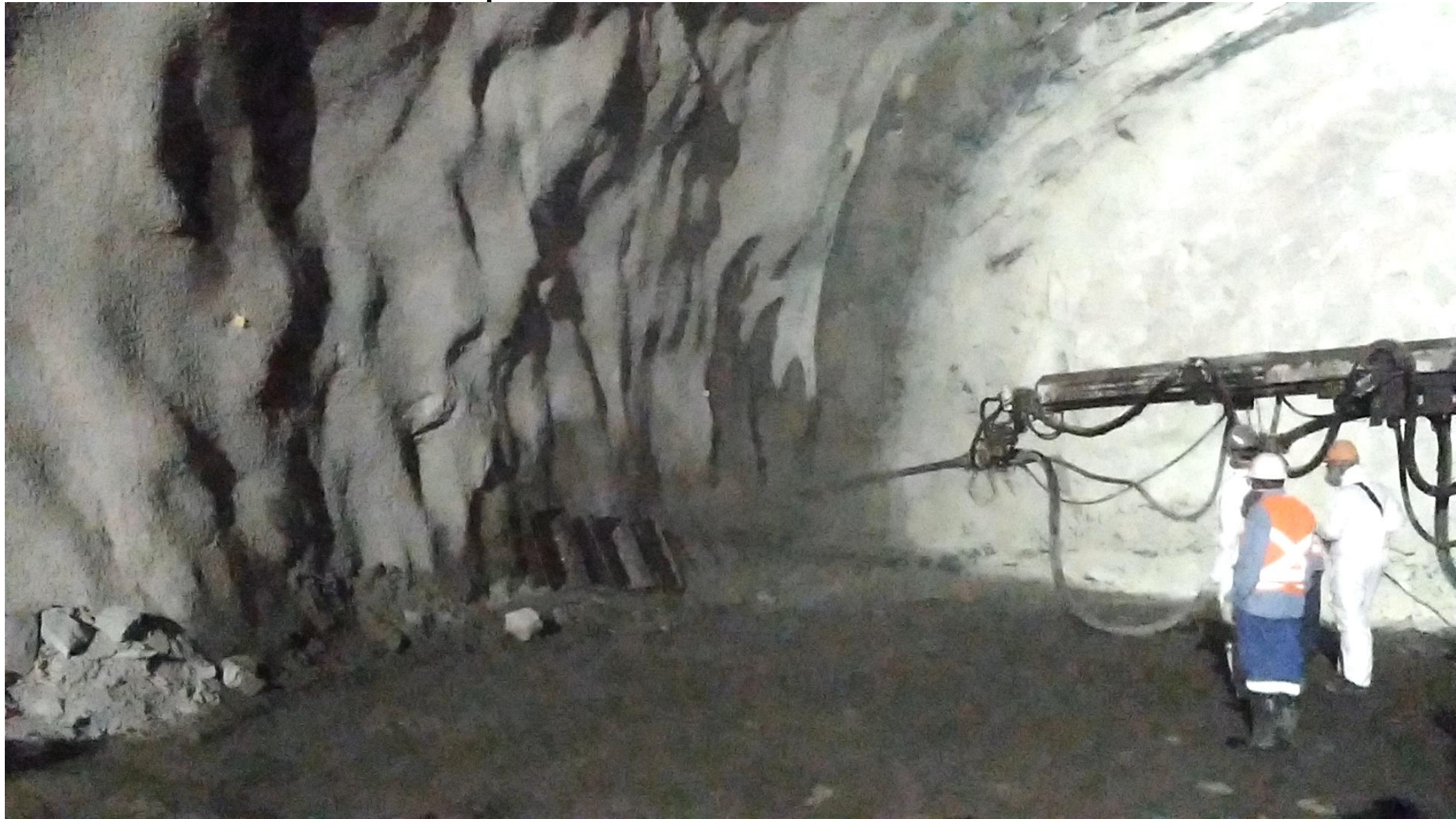
Alimentação da bomba via úmida a pistão



Jateamento das placas



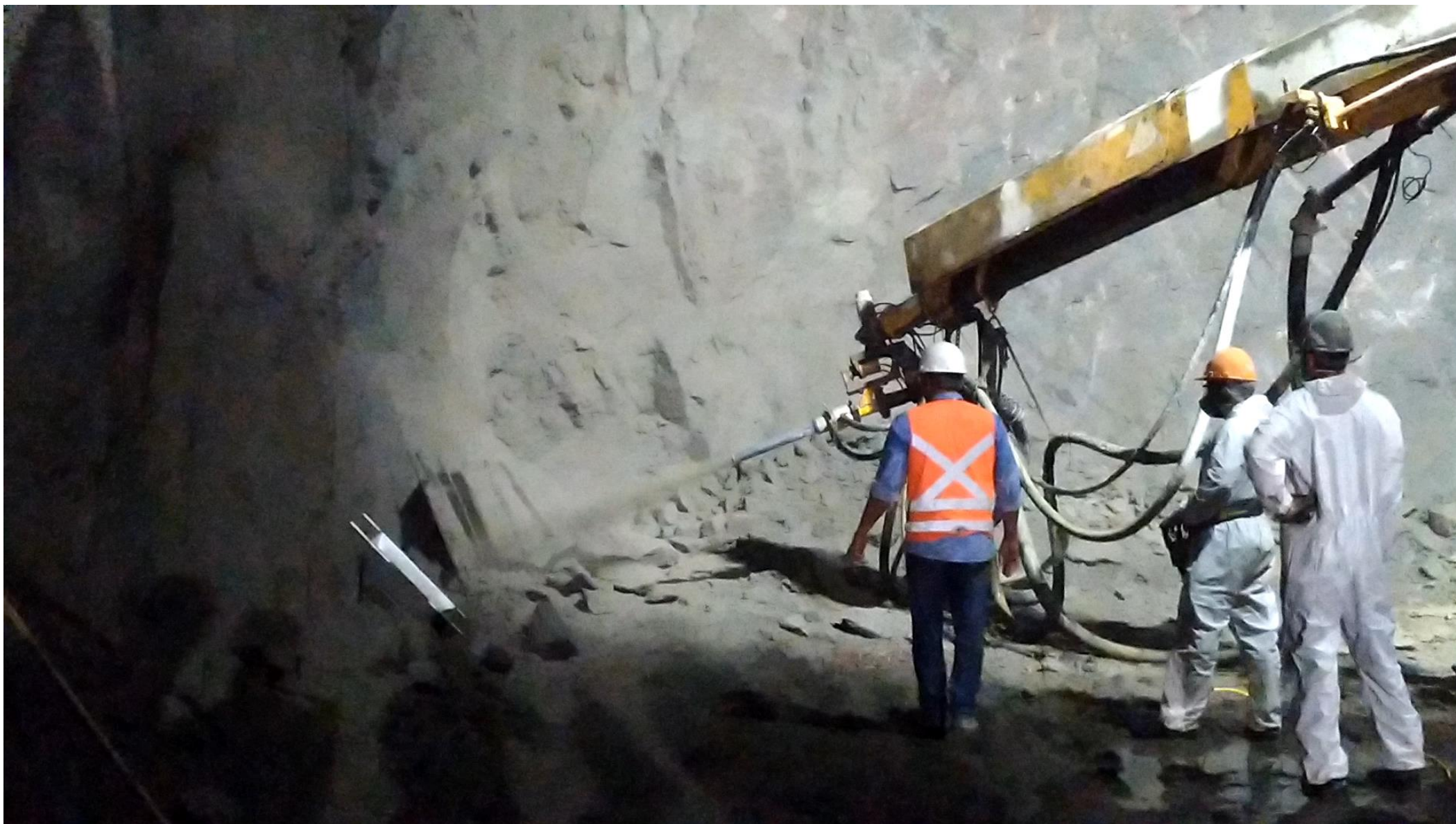
Jateamento das placas



Jateamento das placas



Jateamento das placas



Jateamento do revestimento do túnel



Remoção das placas



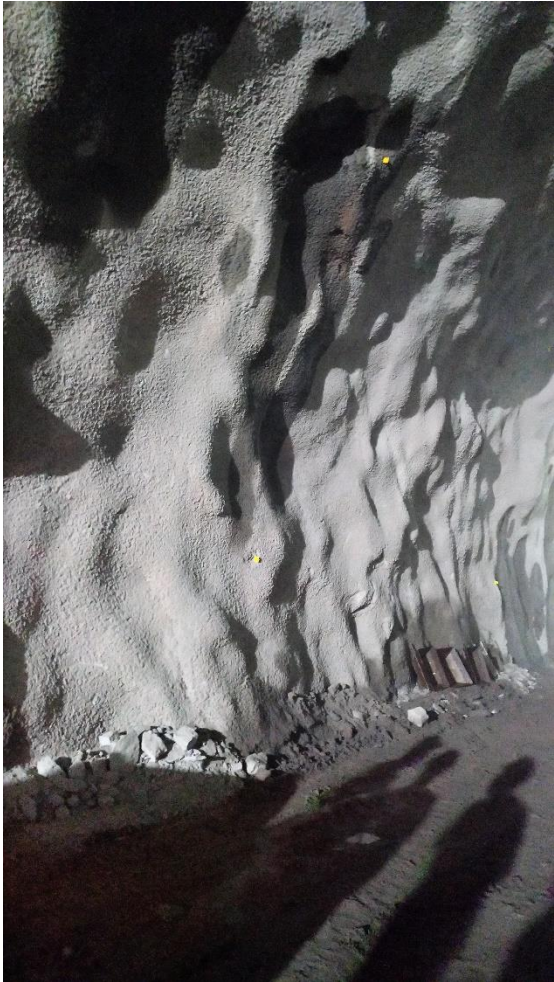
Identificação das placas



Controle de convergência



Controle de convergência



Extração de testemunhos



Extração de testemunhos



Testemunhos para ensaio Barcelona



Testemunhos para ensaio Barcelona



Ensaio Barcelona



Ensaio de penetração de água sob pressão



Continuação: Ramoel

