

Pesquisas sobre CRF

Discussão de exemplos

PCC 5729 – Aula 4

Antonio D. de Figueiredo

Objetivo da aula

- Apresentar alguns exemplos de pesquisas realizadas na EPUSP
- Discutir enfoque e relevo das mesmas

Analysis of potential use of fibre reinforced recycled aggregate concrete for sustainable pavements

Ricardo Chan

Maurício A.Santana

André M.Oda

Ricardo C.Paniguel

Luiz B.Vieira

Antonio D.Figueiredo

IsaacGalobardes

Journal of Cleaner Production

Volume 218, 1 May 2019, Pages 183-191

1. Introdução

- A indústria da construção civil deve consumir muito resíduo: minimiza deposições em aterros e consumo de material virgem
- A utilização de resíduos de maior uniformidade potencializa o uso para aplicações estruturais
- Um problema típico é a redução da resistência à compressão do concreto com o uso de resíduos por aumentar a porosidade do material.

Influência da porosidade dos agregados

Coarse Aggregate	Recycled 1.9 – 2.2 g/cm ³	Recycled 2.2 – 2.5 g/cm ³	Ordinary
Density (g/cm ³)	2.07	2.50	2.63
Water absorption (%)	6.75	2.16	0.03
Maximum size (mm)	19	19	19



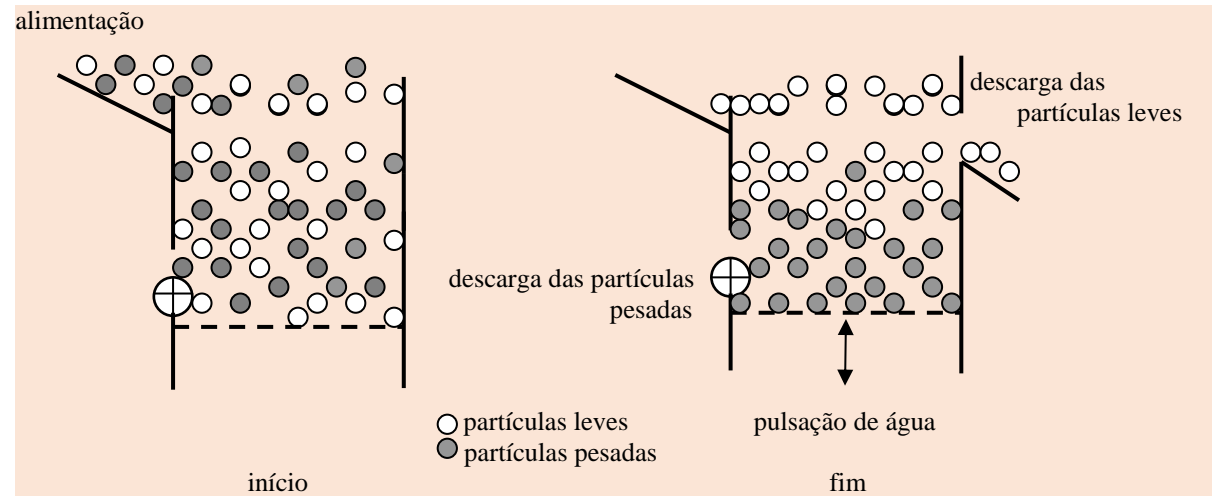
FIGUEIREDO, ANTONIO D.; PIETRA, IVIE ; BITENCOURT JR., LUÍS A.G. . INFLUENCE OF LOW CONTENT OF STEEL FIBRE ON CONCRETES PRODUCED WITH RECYCLED COARSE AGGREGATES WITH DIFFERENT LEVELS OF DENSITY. In: Brazilian Conference on Composite Materials, 2018, Rio de Janeiro. Proceedings of the 4th Brazilian Conference on Composite Materials. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018. p. 250.

Separação dos Agregados Reciclados por Densidade

Britagem



Jigues



Programa Experimental

Separação dos Agregados Graúdos Reciclados



Ferro-silício moído

Sink and Float



Programa Experimental

Agregado Graúdo Reciclado

Separação em duas faixas de massa específica

- $1,9 \text{ g/cm}^3 < d < 2,2 \text{ g/cm}^3$ (40%)

- $2,2 \text{ g/cm}^3 < d < 2,5 \text{ g/cm}^3$ (35%)

Programa Experimental

Homogeneização dos Agregados Gráudos Reciclados



Programa Experimental

Agregados Graúdos Utilizados



1,9 – 2,2

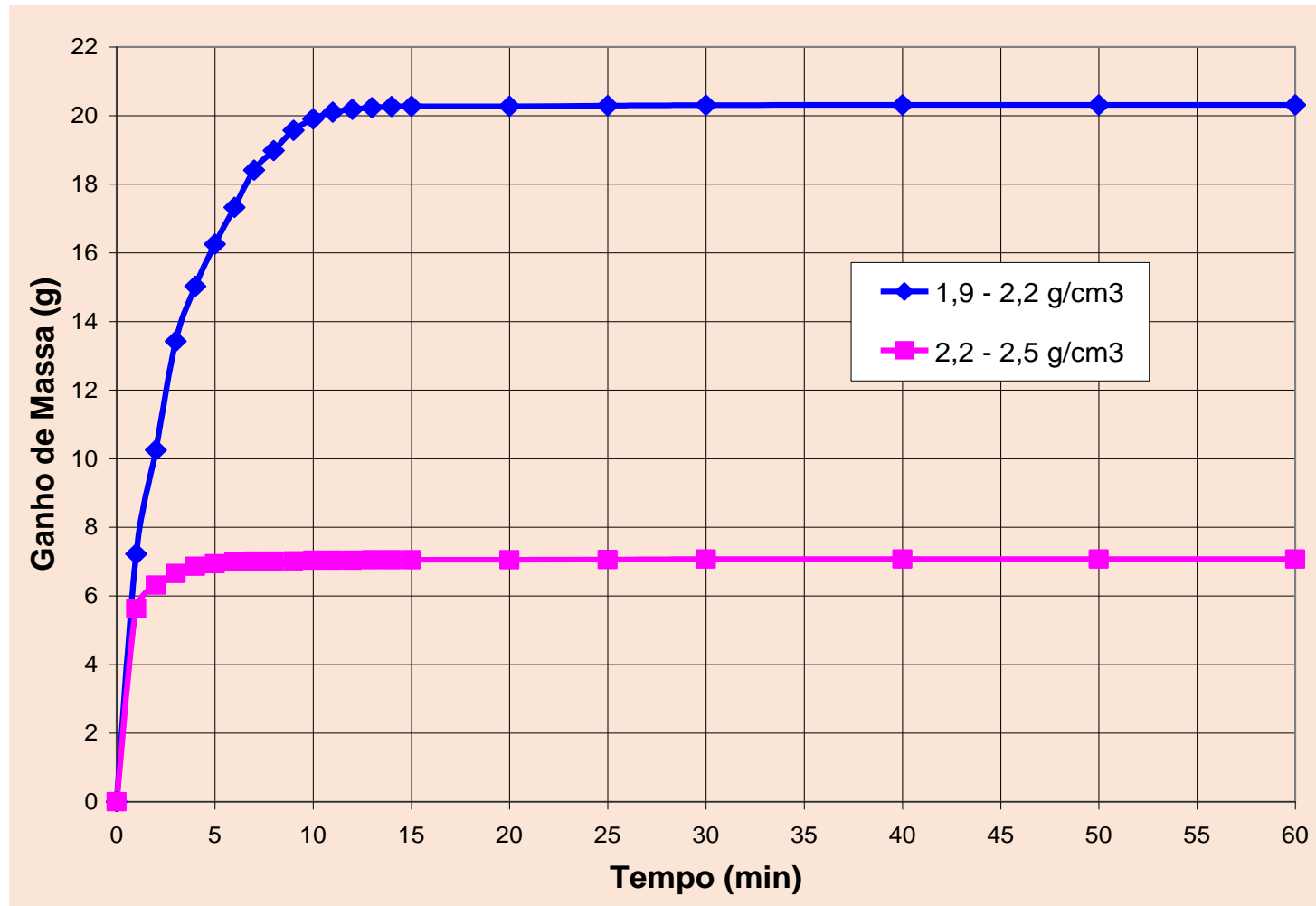


2,2 – 2,5

natural

Programa Experimental

Pré-Umedecimento dos Agregados Reciclados



Programa Experimental

Fibras de Aço



Aditivo Redutor de Água:

Plastificante Mastermix 394N (MBT)

Programa Experimental

Estudo de Dosagem (Helene; Terzian, 1992)

Teor Ótimo de Argamassa:

- Reciclado 1,9 – 2,2 g/cm³: 54% em massa
- Reciclado 2,2 – 2,5 g/cm³: 52% em massa
- Natural: 48%



Programa Experimental

- 1:3 1:4,5 1:6
- Abatimento: 80 ± 10 mm
- Aditivo: 0,6% massa cimento
- Teores de fibras: 0, 10, 20, 40 kg/m³

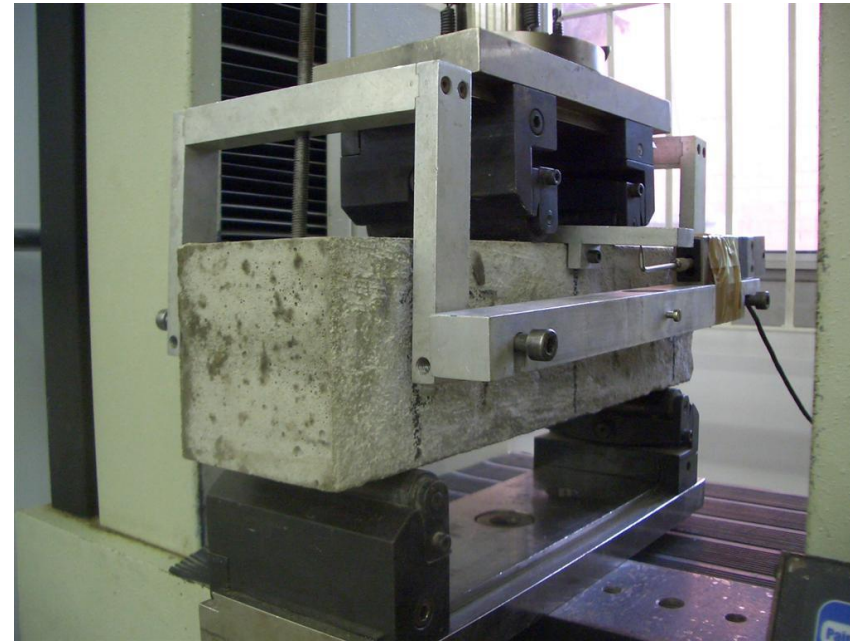
Programa Experimental

Ensaio (28 dias)	Norma	Corpos-de-Prova
Tração na Flexão (resistência à tração e tenacidade)	JSCE-SF4	4 x (10x10x40)
Compressão Axial	NBR 5739	3 x (10x20)
Absorção de Água	NBR 9778	2 x (10x20)

Programa Experimental



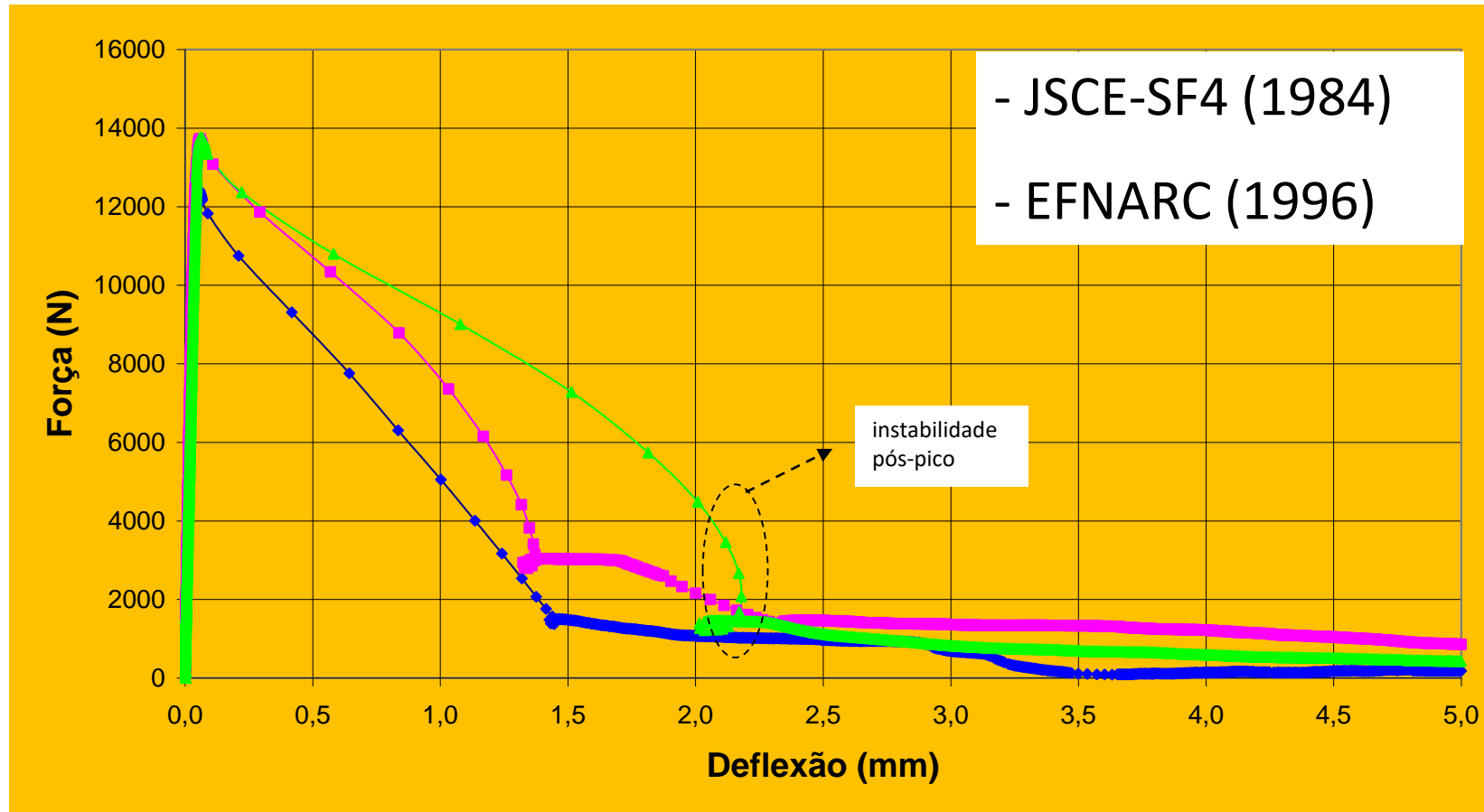
Compressão Axial



Tração na Flexão

Programa Experimental

Determinação da Tenacidade



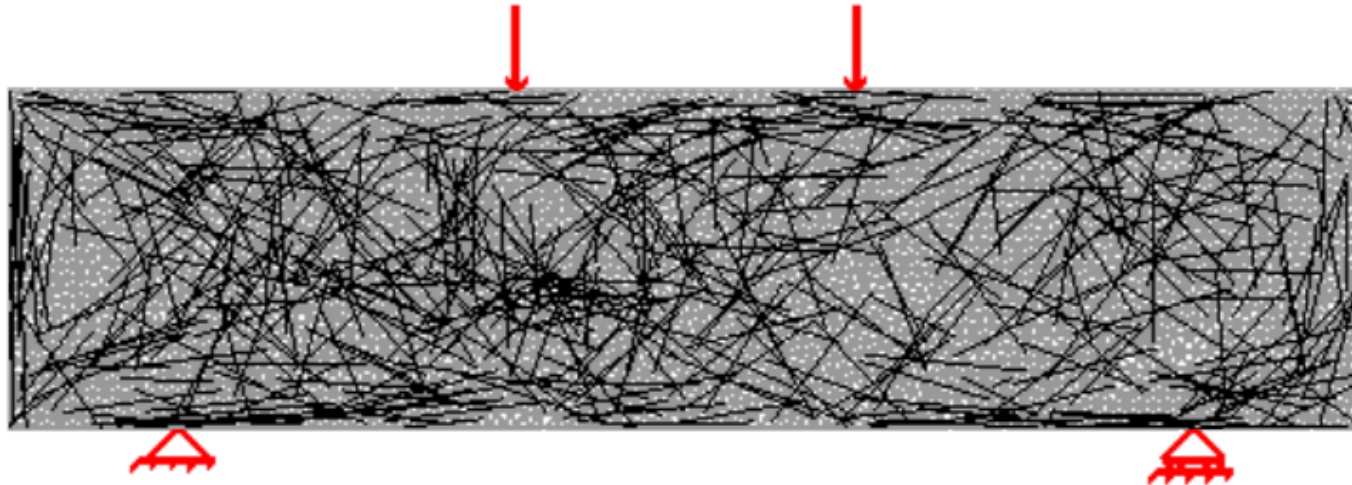
Experimental program: Test methods

- 5 cylindrical specimens (10x20cm) were used for compressive test
- 4 prismatic specimens (10x10x40cm) for flexural strength (**LOP**) determination



Numerical analyses

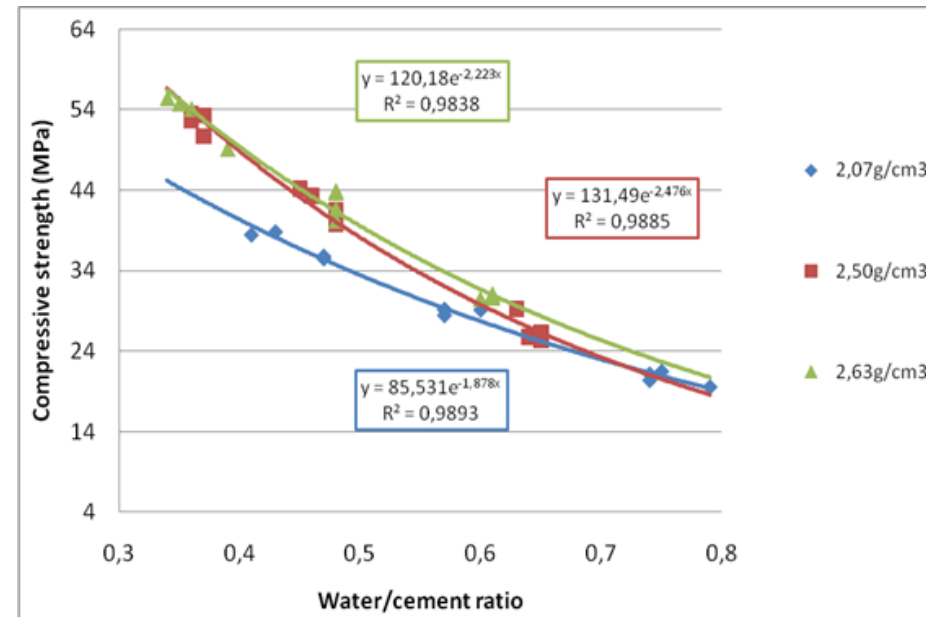
- Numerical model was constructed using a discrete and explicit representation of the fibres (Bitencourt Jr., 2015).
- Evaluation of fibres' contribution on flexural behavior:
 - Coarse aggregates: recycled ($2,07 \text{ g/cm}^3$) and ordinary ($2,63 \text{ g/cm}^3$).
 - Steel fibres contents of 0 and 40 kg/m^3 .



Results and discussion

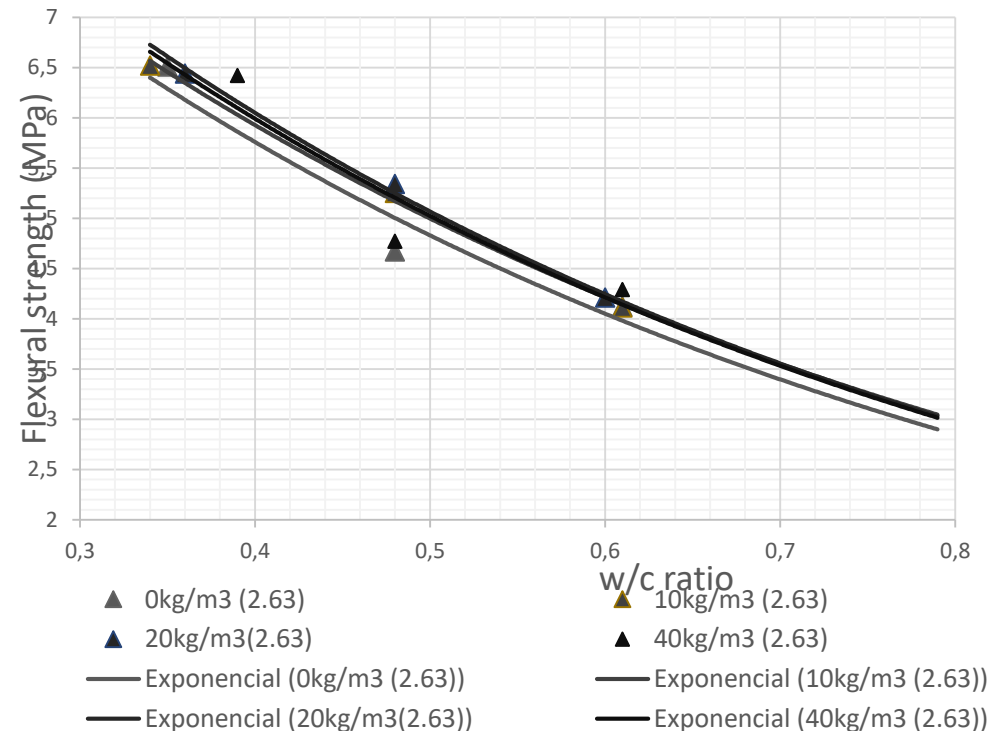
Results and discussion: compressive strength

- There is no influence of fibre content as expected.
- The behaviour of concretes produced with recycled aggregates with density of 2.50 g/cm^3 were very close to ordinary concrete.
- The mixtures produced with recycled aggregates with 2.07 g/cm^3 presented a reduced level of strength specifically for lower level of w/c ratio ($w/c \leq 0.6$)



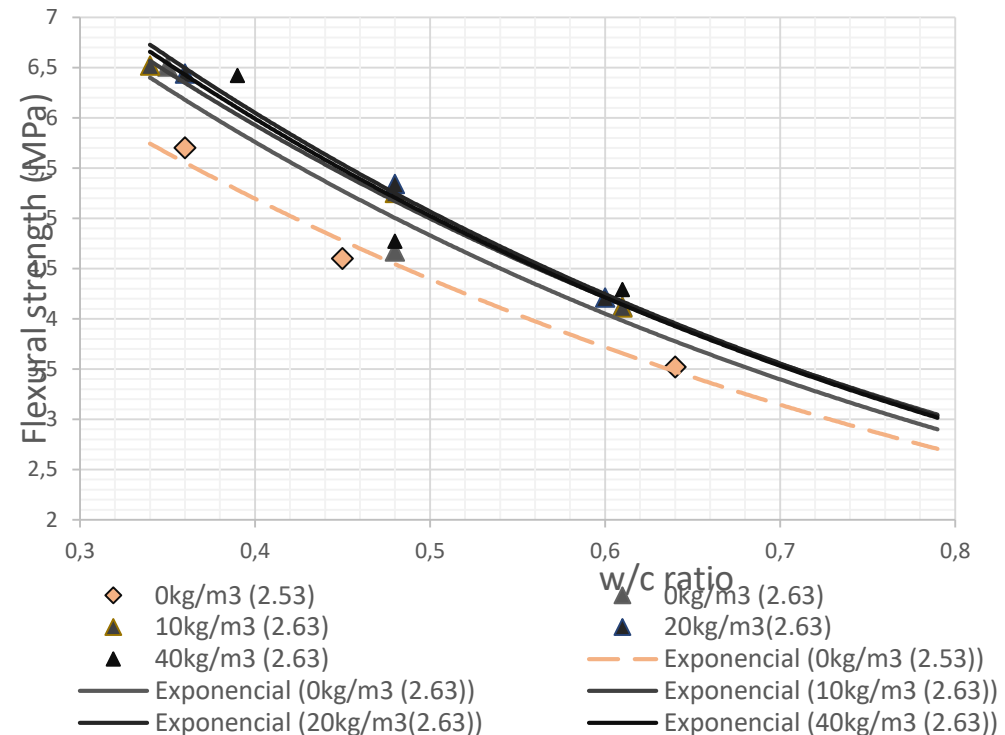
Results and discussion: flexural strength

- Ordinary concrete:
- Negligible influence of fibre content
- LOP is defined by the matrix
- w/c is the main parameter



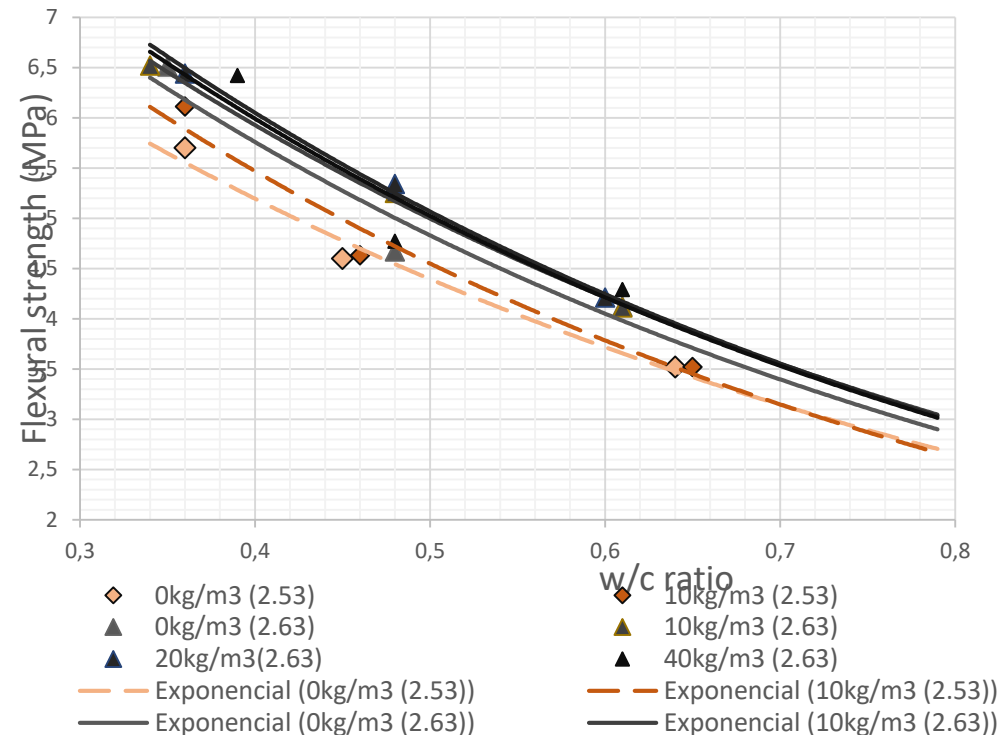
Results and discussion: flexural strength

- Recycled aggregate with density of 2.50 g/cm^3
- 0 kg/m^3 of fibres



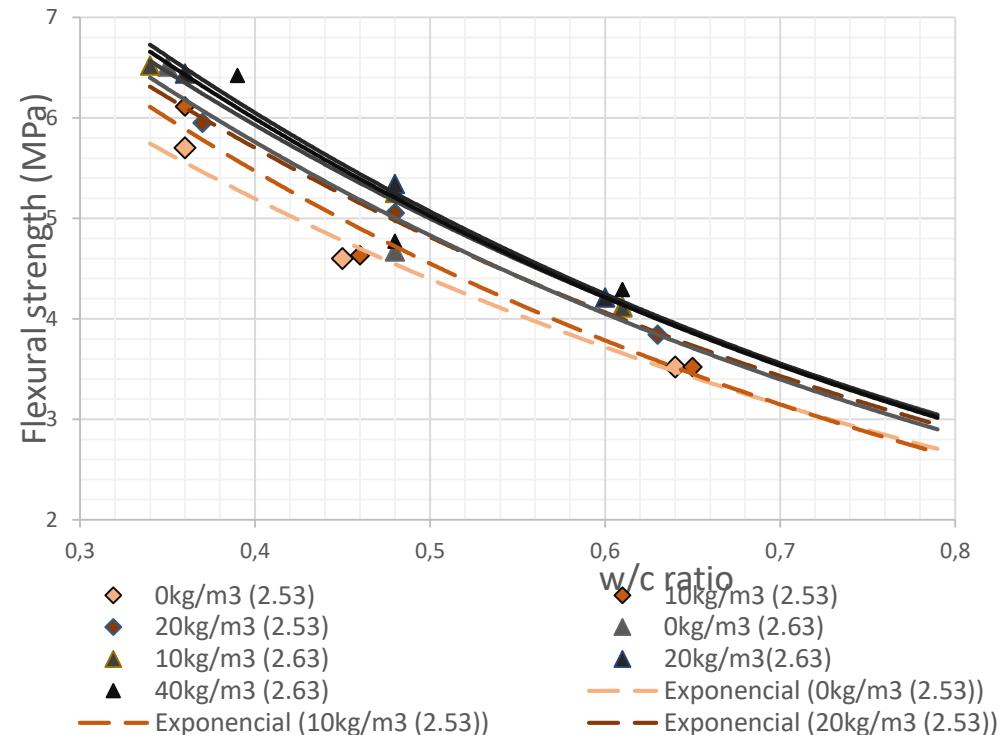
Results and discussion: flexural strength

- Recycled aggregate with density of 2.50 g/cm^3
- 0 kg/m^3 of fibres
- 10 kg/m^3 of fibres



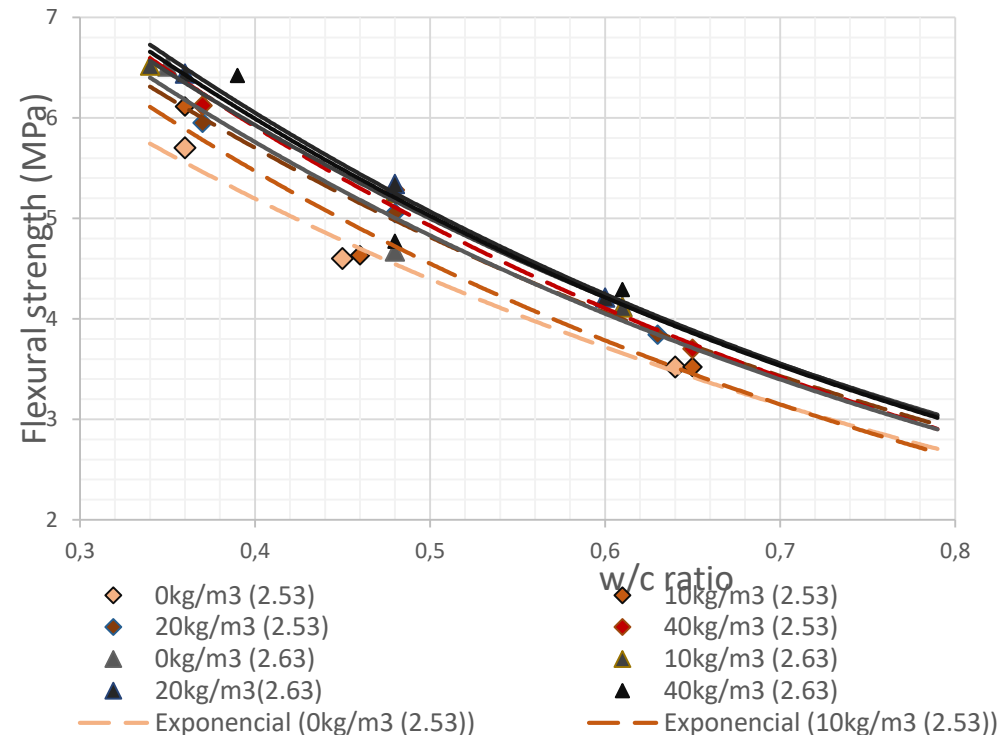
Results and discussion: flexural strength

- Recycled aggregate with density of 2.50 g/cm^3
- 0 kg/m^3 of fibres
- 10 kg/m^3 of fibres
- 20 kg/m^3 of fibres



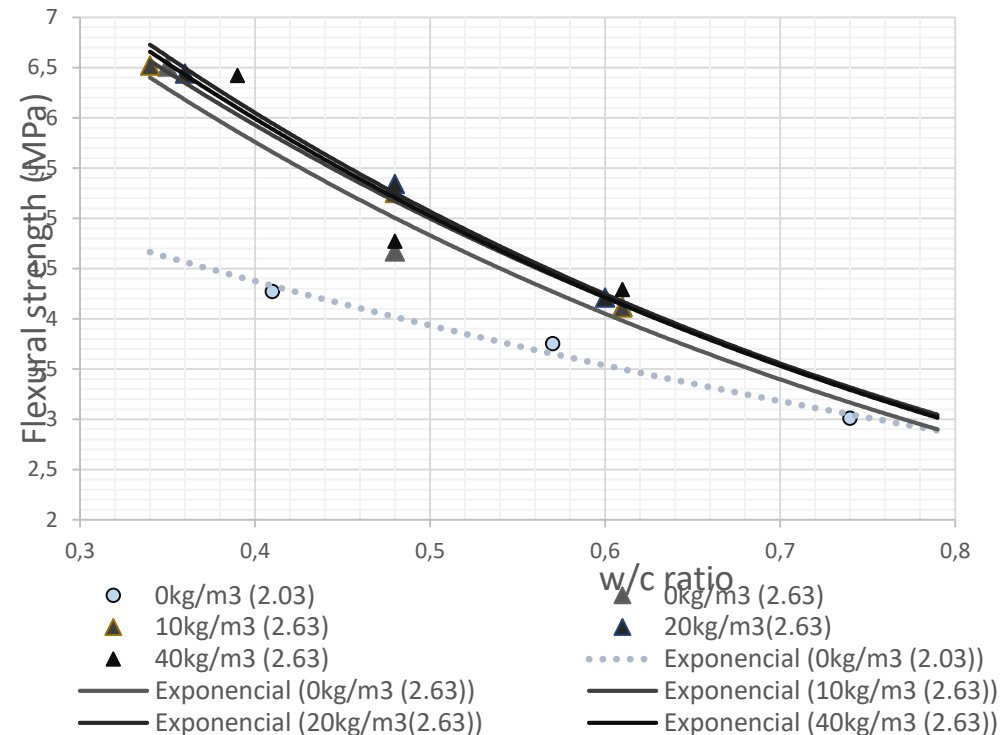
Results and discussion: flexural strength

- Recycled aggregate with density of 2.50 g/cm^3
- 0 kg/m^3 of fibres
- 10 kg/m^3 of fibres
- 20 kg/m^3 of fibres
- 40 kg/m^3 of fibres



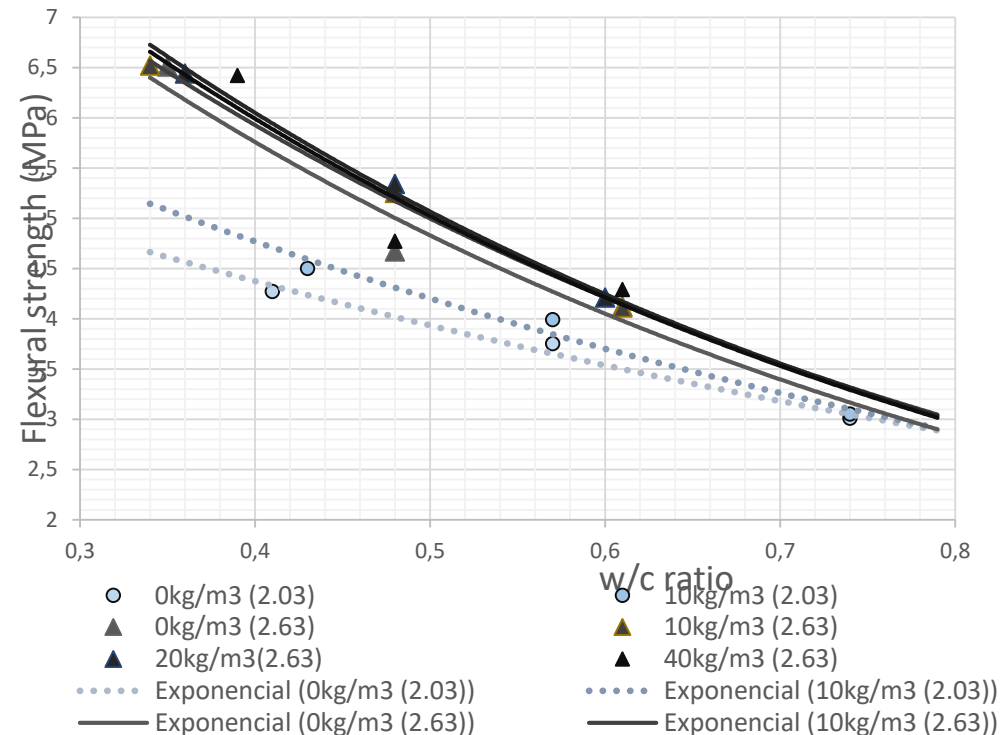
Results and discussion: flexural strength

- Recycled aggregate with density of 2.03 g/cm^3
- 0 kg/m^3 of fibres



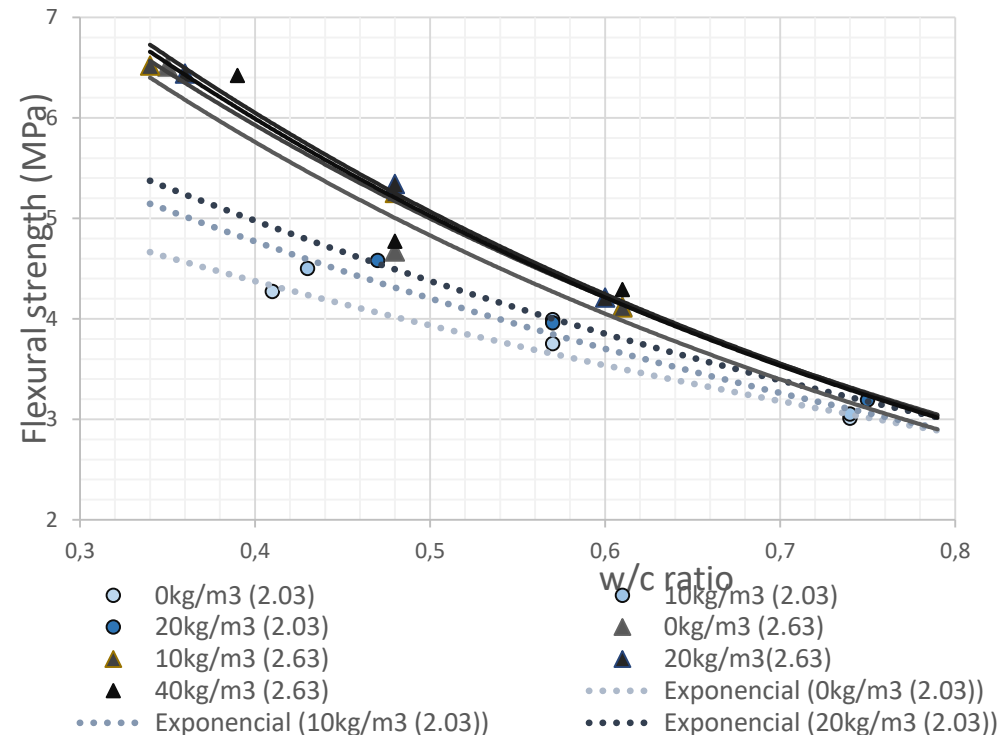
Results and discussion: flexural strength

- Recycled aggregate with density of 2.03 g/cm^3
- 0 kg/m^3 of fibres
- 10 kg/m^3 of fibres



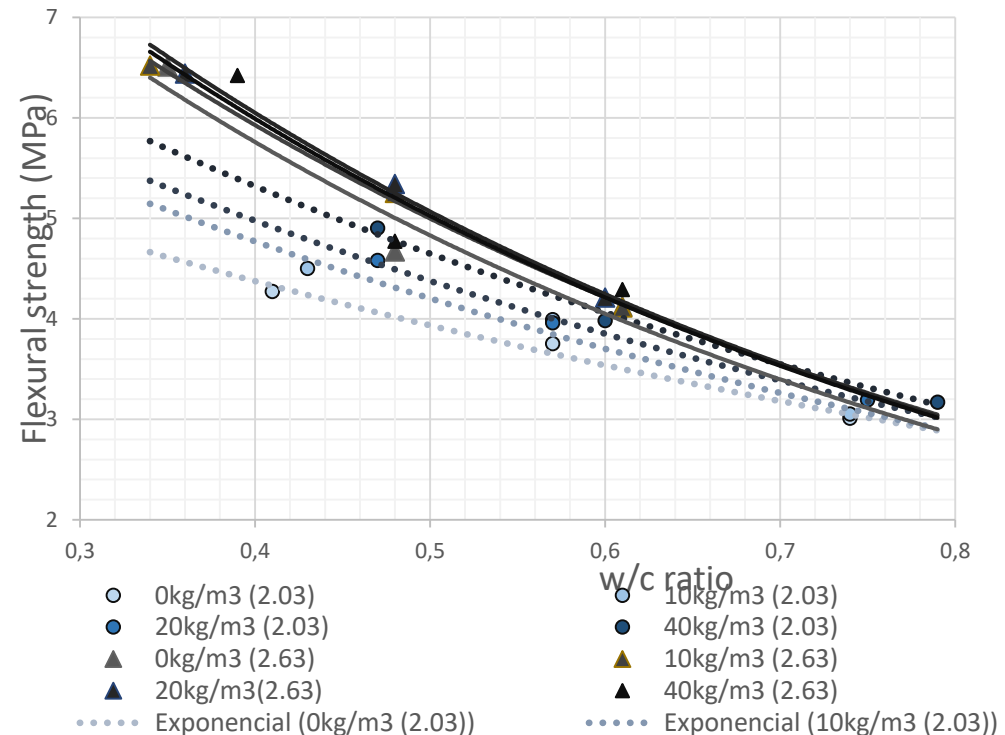
Results and discussion: flexural strength

- Recycled aggregate with density of 2.03 g/cm^3
- 0 kg/m^3 of fibres
- 10 kg/m^3 of fibres
- 20 kg/m^3 of fibres



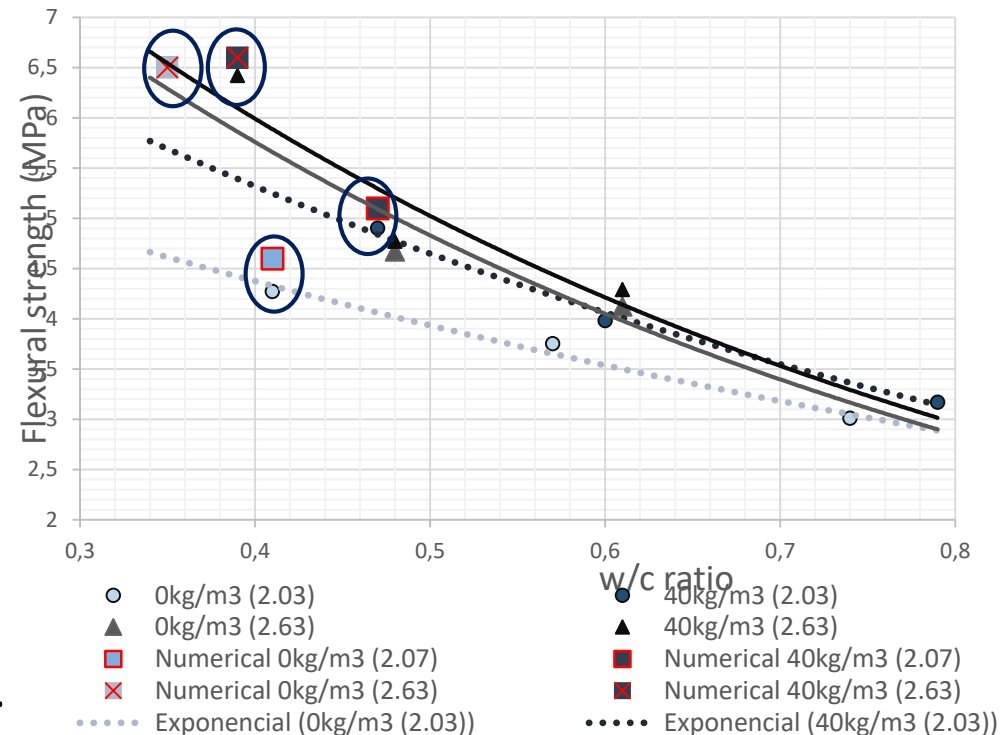
Results and discussion: flexural strength

- Recycled aggregate with density of 2.03 g/cm^3
- 0 kg/m^3 of fibres
- 10 kg/m^3 of fibres
- 20 kg/m^3 of fibres
- 40 kg/m^3 of fibres



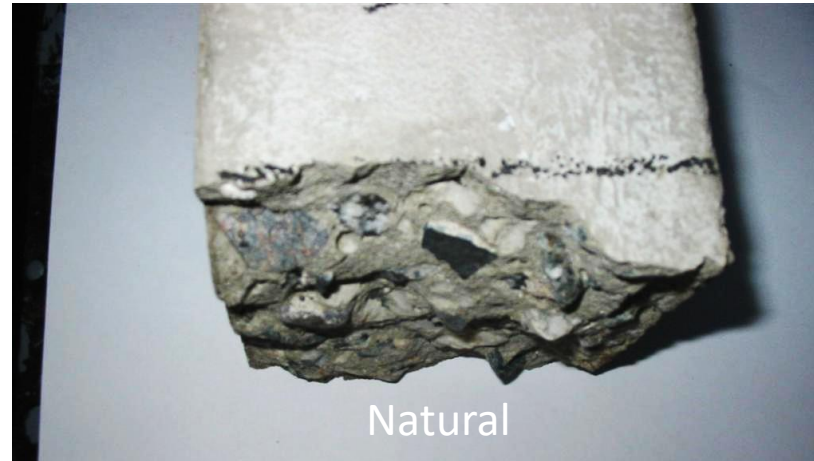
Results and discussion: flexural strength – numerical analysis

- The results are very close to the test results.
- Ordinary without fibres
- Ordinary with 40kg/m³ of fibres
- Recycled (2.03) without fibres
- Recycled (2.03) with 40kg/m³ of fibres
- The numerical results are slightly above the experimental ones, but **confirm the tendency**.



Resultados

Superfícies de Ruptura



Reciclado 1,9 – 2,2

TF = 40 kg/m³

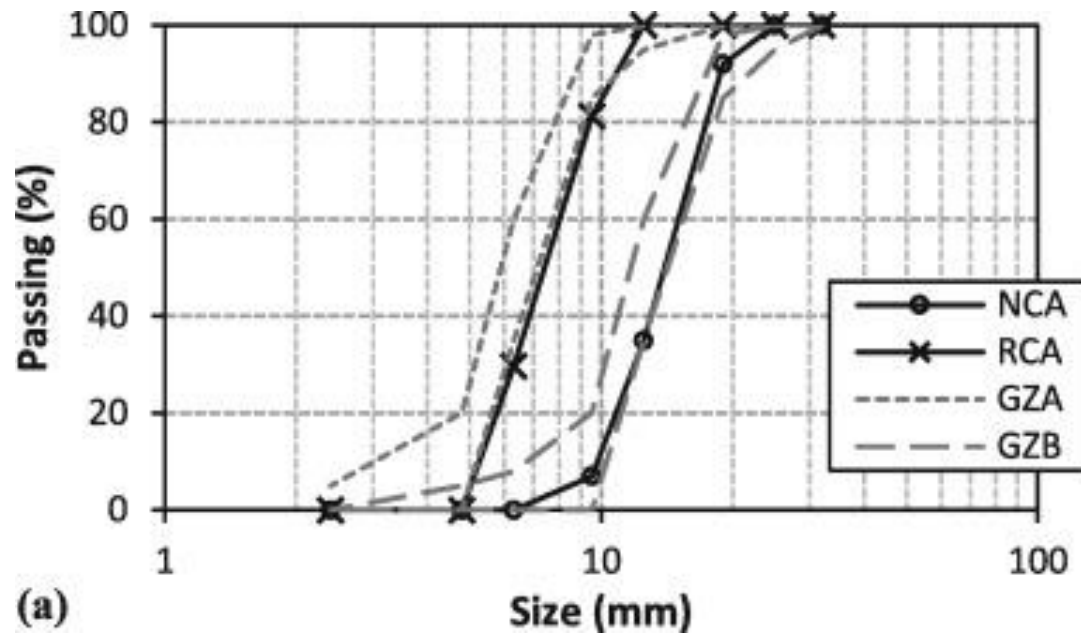


Voltando à vaca fria

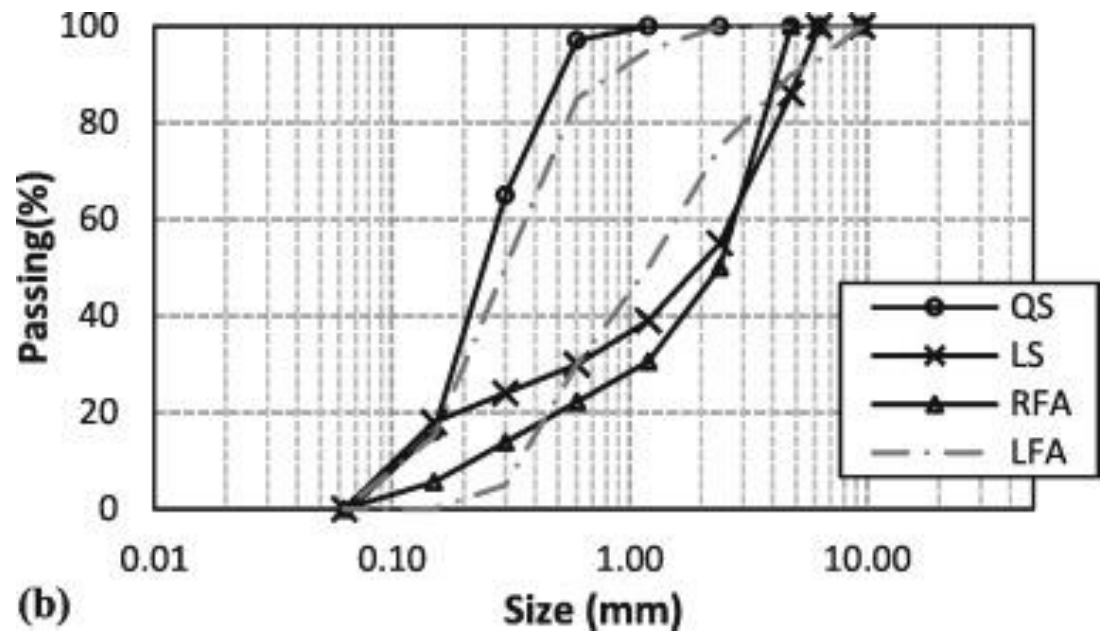
- A ideia era aplicar o CRF com agregados reciclados em pavimentos aproveitando a capacidade resistente residual
 - Foco no dimensionamento do modelo proposto por:
 - S.K. Nayar, R. Gettu **On the design of steel fibre reinforced concrete pavements and slabs-on-grade.** J. Barros (Ed.), 8th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Challenges and Opportunities (BEFIB2012), RILEM Publications SARL (2012), pp. 1070-1081
- Pavimento modelado por elementos finitos para um determinado padrão de carregamento
- Avaliação simplificada do nível de emissões:
 - A.R.E. Cáceres, V.M. John, A.D. de Figueiredo **Comparação entre pavimentos de concreto armado e de concreto reforçado com fibras com relação às emissões globais de CO₂.** Anais Do 56o Congresso Brasileiro Do Concreto, IBRACON (2014)

Dosagem da matriz

Particle size distribution of natural and recycled coarse aggregates

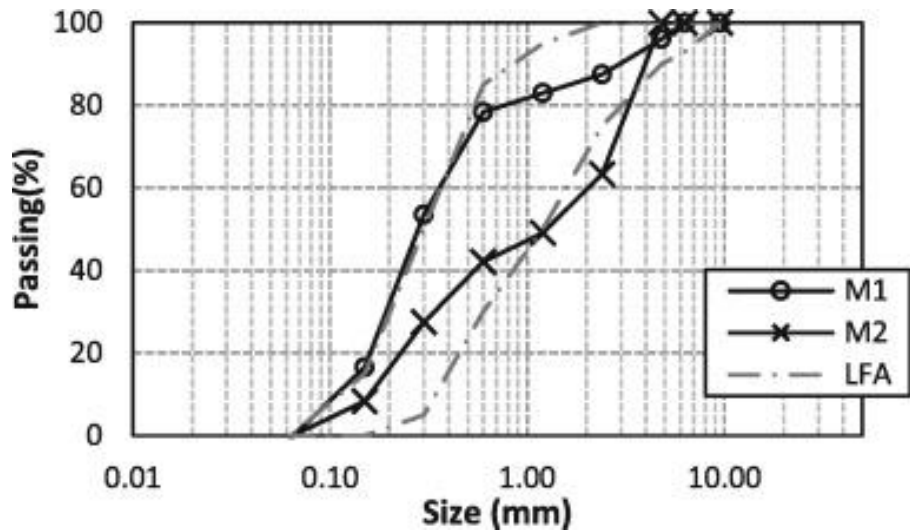


Particle size distribution of quartz sand, limestone sand and recycled fine aggregates



Mistura final homogeneizada

Particle size distribution of fine aggregates mixes.

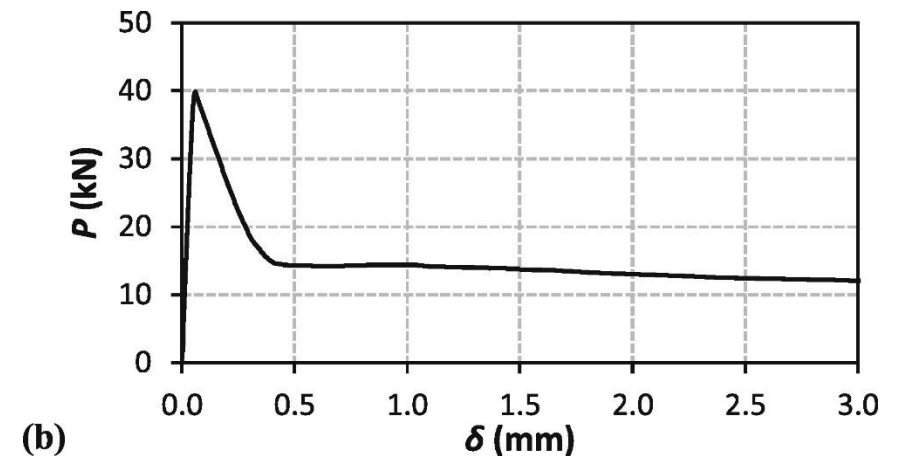
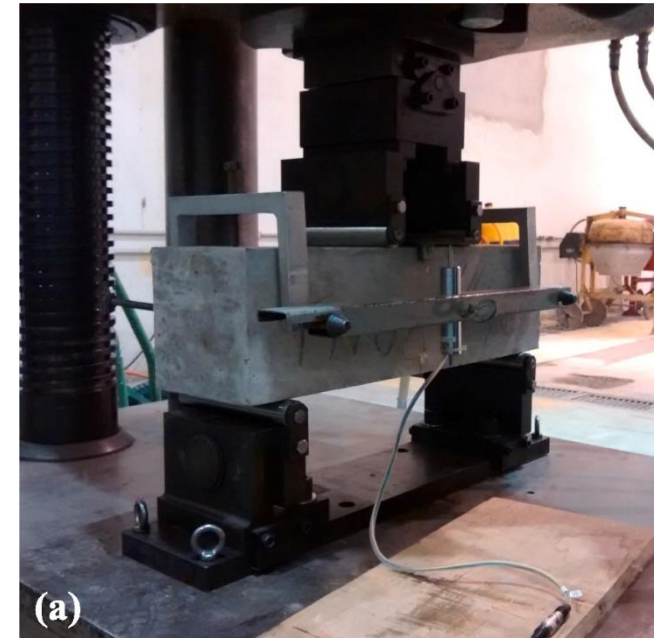


Reference mix designs (kg/m³).

Mix	Cement	w/c ratio	Water	Fine aggregate			Coarse aggregate		PP
				Quartz sand	Limestone sand	RFA	NCA	RCA	
FRC	377.0	0.48	181.0	584.0	225.0	–	1054.0	–	2.49
FRRAC	377.0	0.48	278.4	216.1	–	592.9	–	1054.0	2.49

Métodos de ensaio

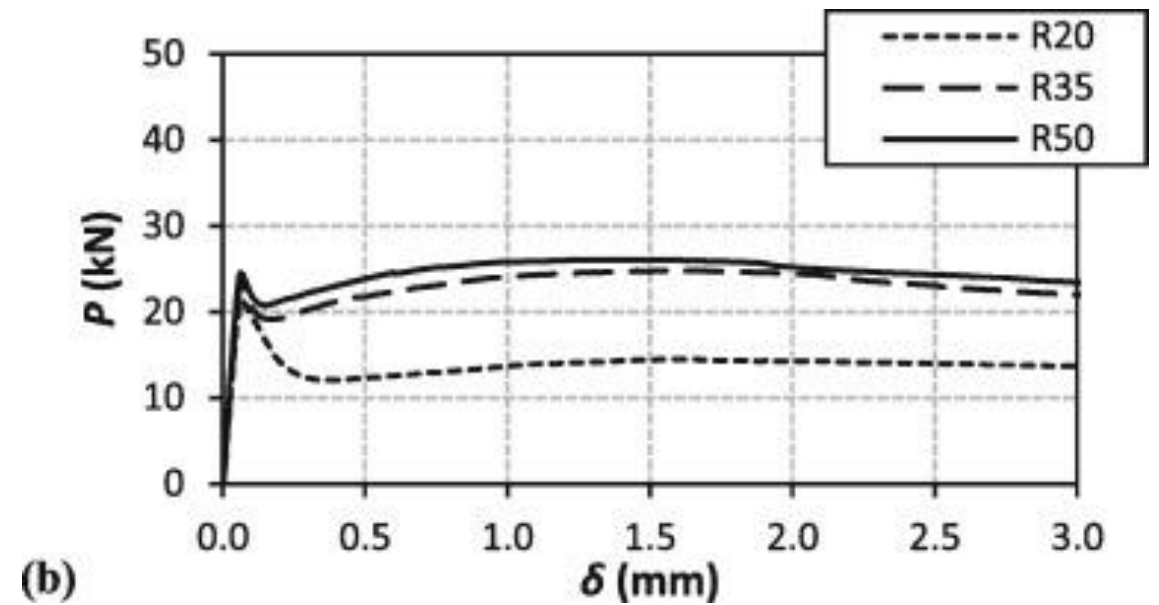
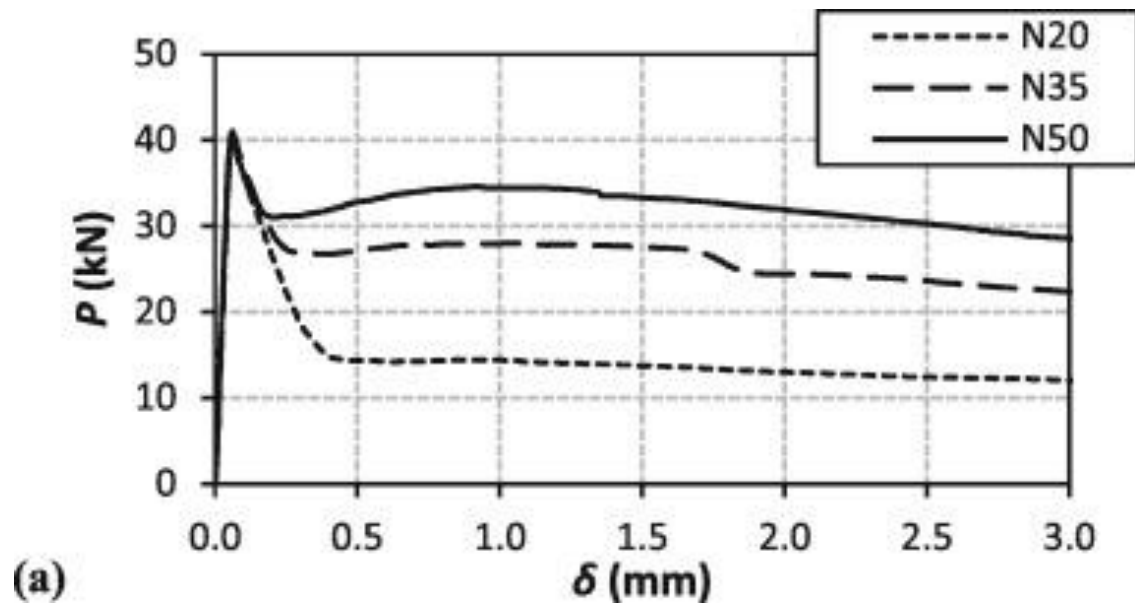
- Resistência à compressão a 3, 7 e 14 dias de idade.
- Módulo de elasticidade aos 14 dias de idade
- C1609 para resistência à tração por flexão com deformação controlada aos 14 dias



Resultados e discussões

Concrete mixes	3 days		7 days		14 days	
	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (GPa)	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (GPa)	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (GPa)
N20	33.81 (0.70%)	–	40.13 (5.91%)	–	46.94 (1.79%)	35.79 (3.58%)
N35	33.41 (2.29%)	–	40.26 (0.84%)	–	46.50 (1.16%)	37.38 (2.36%)
N50	34.06 (1.30%)	–	44.03 (0.05%)	–	49.50 (2.63%)	39.25 (3.93%)
R20	13.86 (1.18%)	–	17.69 (7.74%)	–	18.50 (0.12%)	19.07 (1.87%)
R35	17.34 (2.05%)	–	20.05 (0.71%)	–	23.16 (4.81%)	20.50 (3.73%)
R50	17.27 (9.11%)	–	19.87 (4.64%)	–	23.93 (2.21%)	22.06 (7.39%)

Resultados e discussões

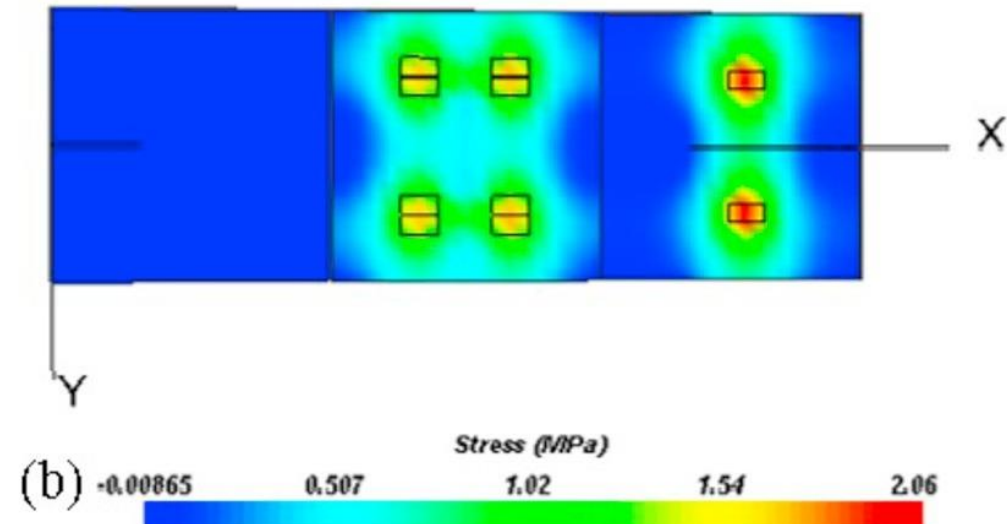
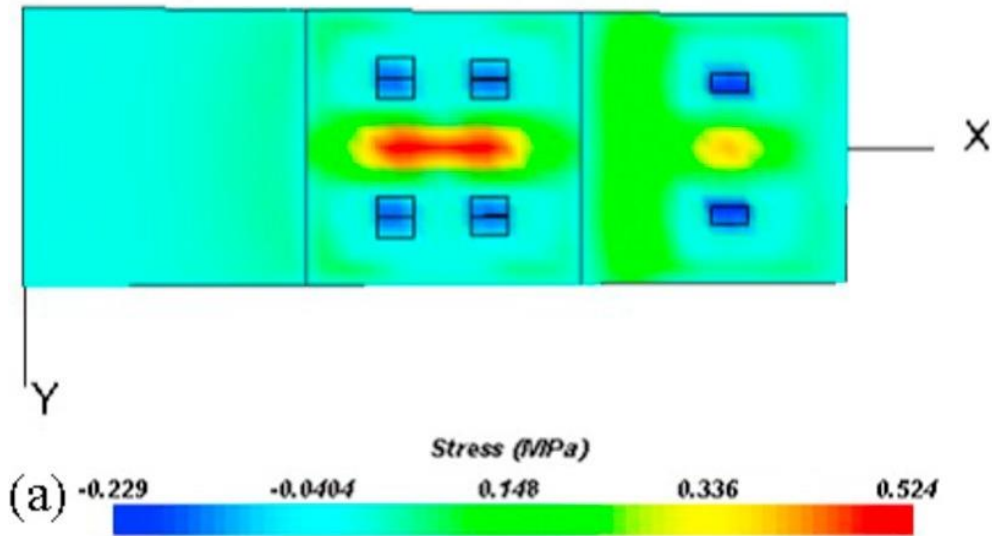
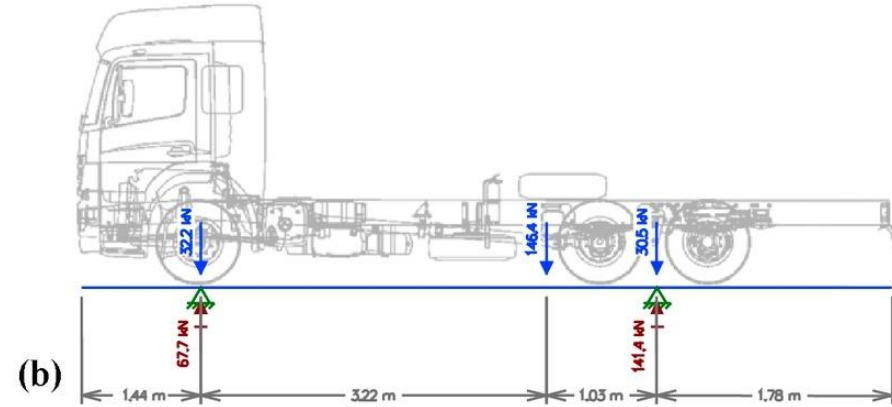
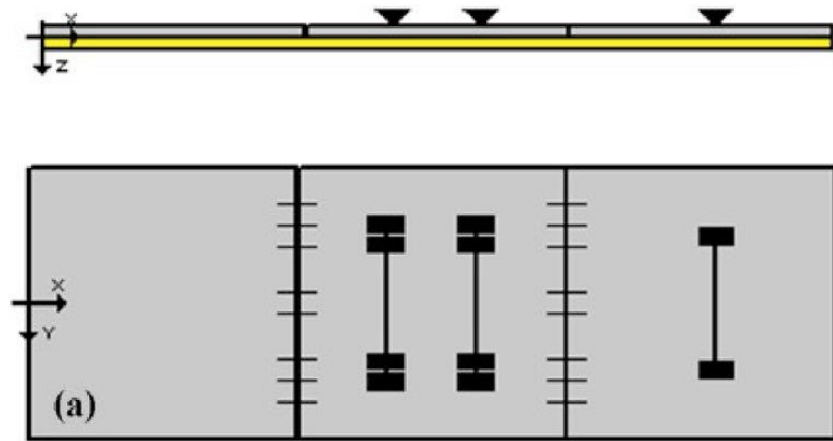


P - δ curves for (a) FRC and (b) FRRAC.

Resultados e discussão

Concrete mixes	f_p (MPa)	$f_{0.75}$ (MPa)	$f_{3.0}$ (MPa)	$T_{3.0}$ (J)
N20	5,23 (7.52%)	1,87 (15.73%)	1,58 (14.21%)	22,93 (8.46%)
N35	5,39 (9.35%)	2,93 (21.34%)	2,49 (22.32%)	32,94 (21.13%)
N50	5,25 (8.15%)	4,38 (6.80%)	3,66 (6.69%)	48,14 (7.27%)
R20	2,80 (6.76%)	1,67 (12.59%)	1,75 (13.07%)	20,79 (11.16%)
R35	3,12 (6.96%)	3,00 (16.47%)	2,85 (21.49%)	34,48 (18.09%)
R50	3,28 (3.19%)	3,32 (11.54%)	3,09 (16.05%)	36,68 (12.46%)

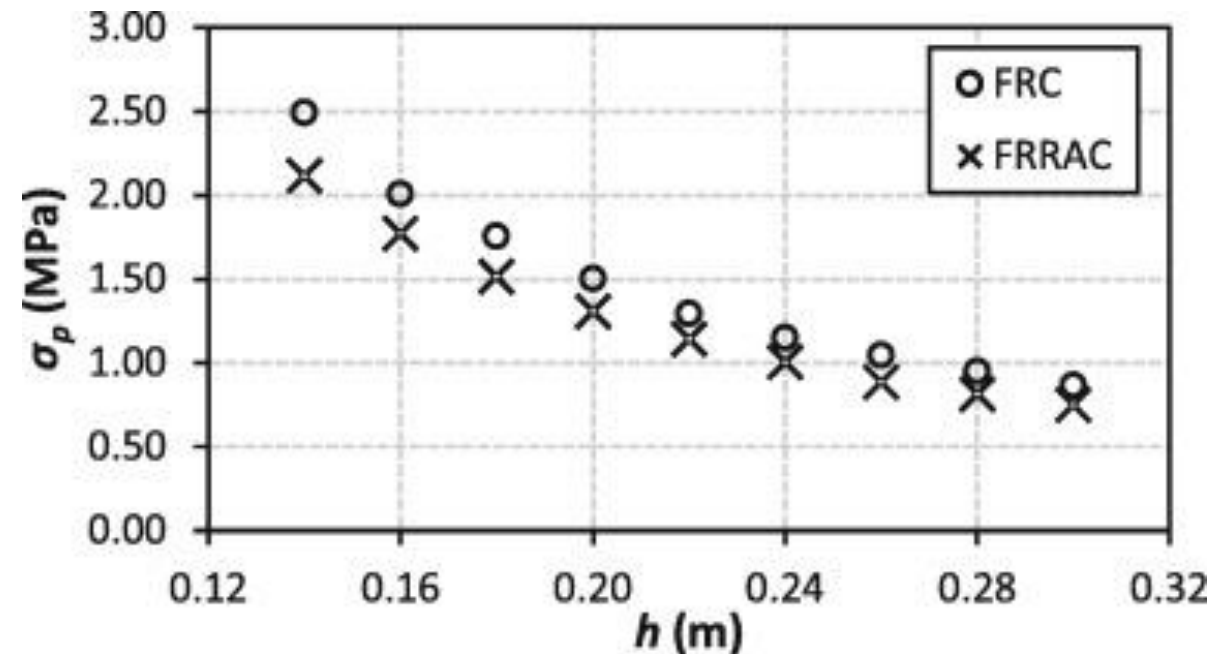
Estudo de caso de pavimento



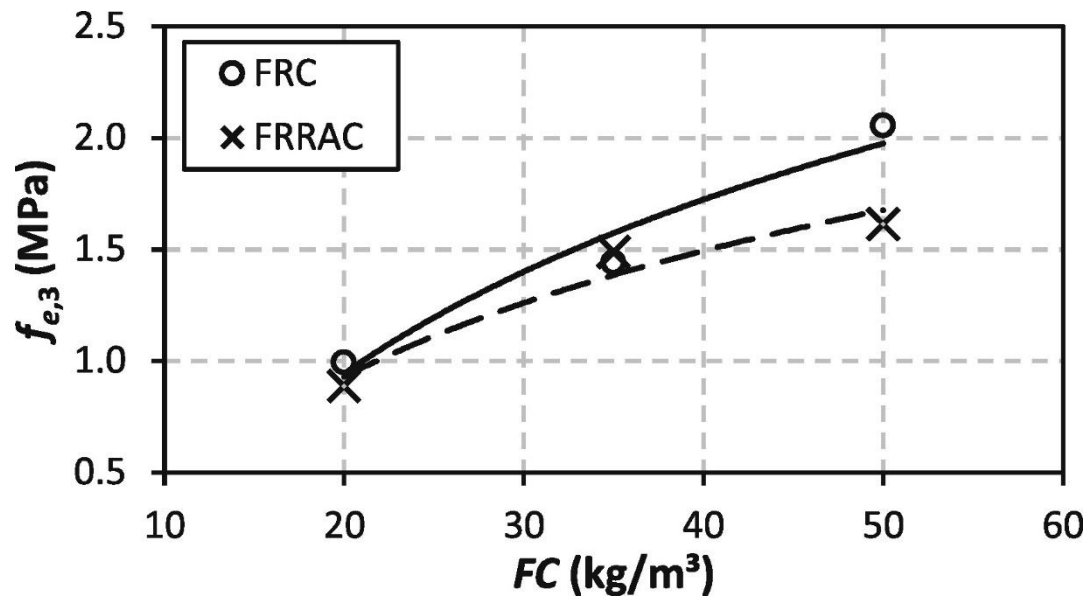
Maximum principal stresses on (a) the top and (b) the bottom of a three slabs system.

Determinação das máximas tensões em função da espessura do pavimento

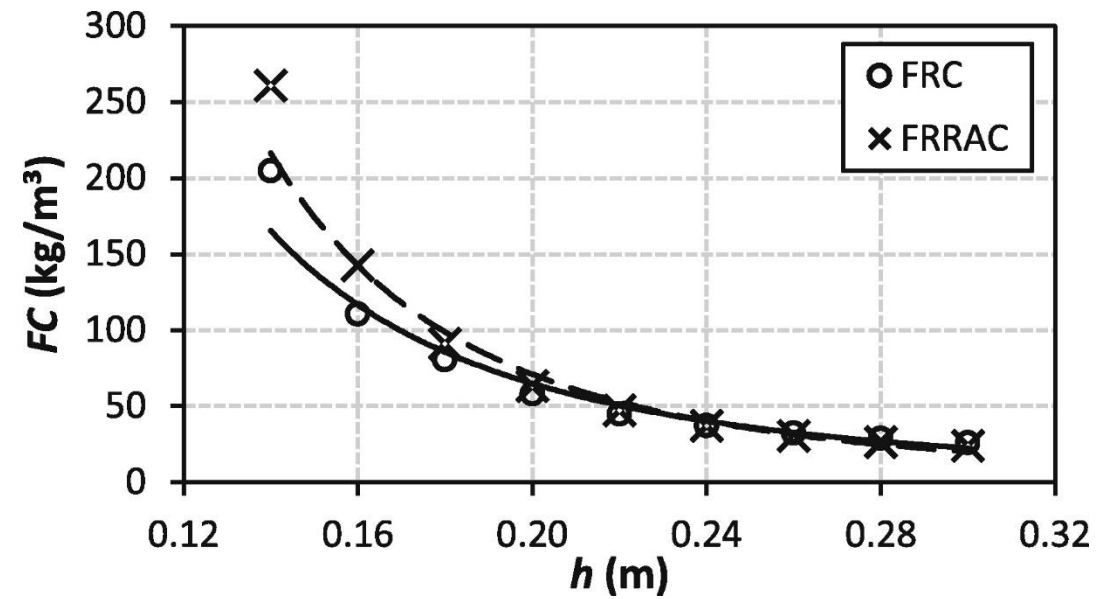
- Os resultados da tensão de tração obtidos com o EverFE (versão 2.23) para diferentes espessuras de lajes são apresentados na Fig ao lado.
- Esses resultados são referentes às principais tensões de tração no fundo das lajes (σ_p), considerando a espessura da laje variando de 0,14 a 0,30 m.



Projeto do pavimento em termos de consumo demandado de fibras



Correlation between $f_{e,3}$ and FC for FRC and FRRAC.

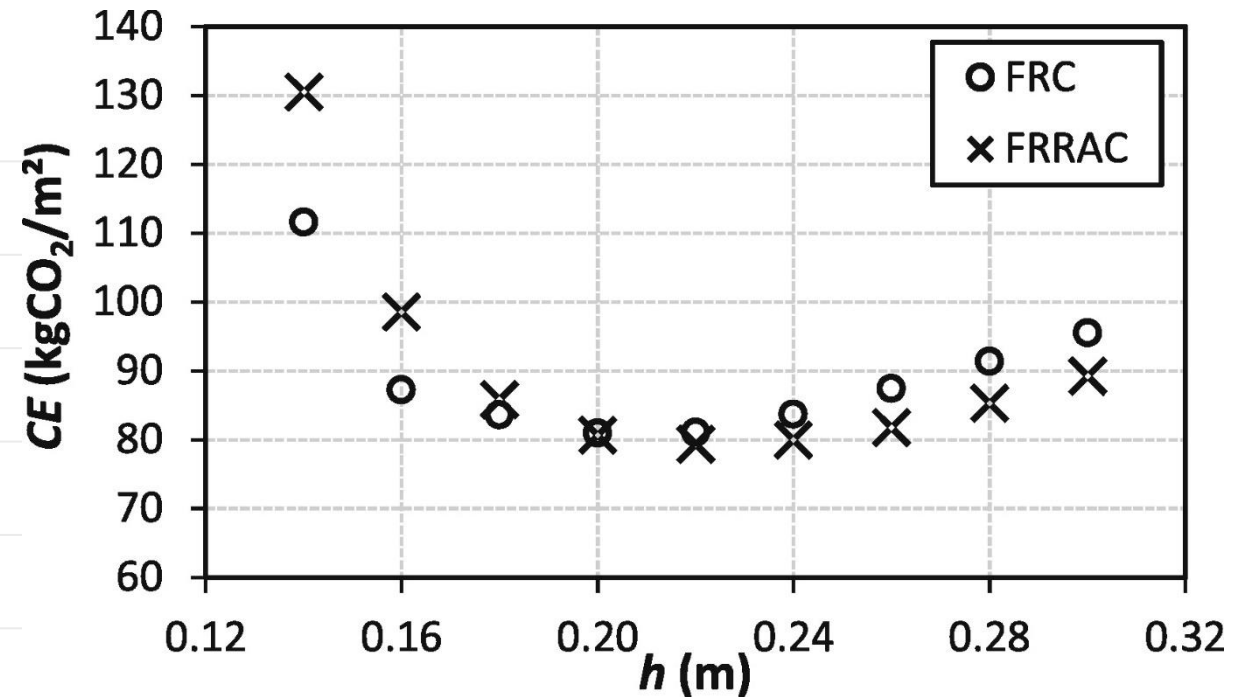


Correlation between the FC and the h for FRC and FRRAC.

Avaliação do nível de emissões

CO₂ emissions for each material

Material	CE (kg CO ₂ /t).
Cement	604
Granite gravel	15.48
Sand	5.83
Recycled aggregate	2.75
Steel fibre	2680.00



Correlation between the CE and the h for FRC and FRRAC.

Conclusões

- O concreto agregado reciclado reforçado com fibra é potencialmente viável para pavimentos.
- O estudo de caso mostrou que as lajes de pavimentos com espessura superior a 0,22 m requerem conteúdo de fibra semelhante para suportar as cargas de projeto, independentemente de as lajes serem produzidas com FRC ou FRRAC.
- Além disso, observou-se que as emissões de CO₂ são mais baixas para o FRRAC quando a espessura da laje é superior a 0,20m.
- Boa parte destes resultados podem ser devotados à manutenção da resistência residual em níveis aproximados independentemente da substituição do agregado natural por reciclado.
- Estudos futuros abordando outras propriedades mecânicas, como a resistência à tração e ao impacto, juntamente com a durabilidade desses pavimentos em condições de uso, como a resistência à abrasão (Hesami et al., 2016), ainda são necessários para avaliar as condições mais realistas de equivalência de desempenho.

O RISCO DE FRAGILIZAÇÃO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

Antonio D. de Figueiredo

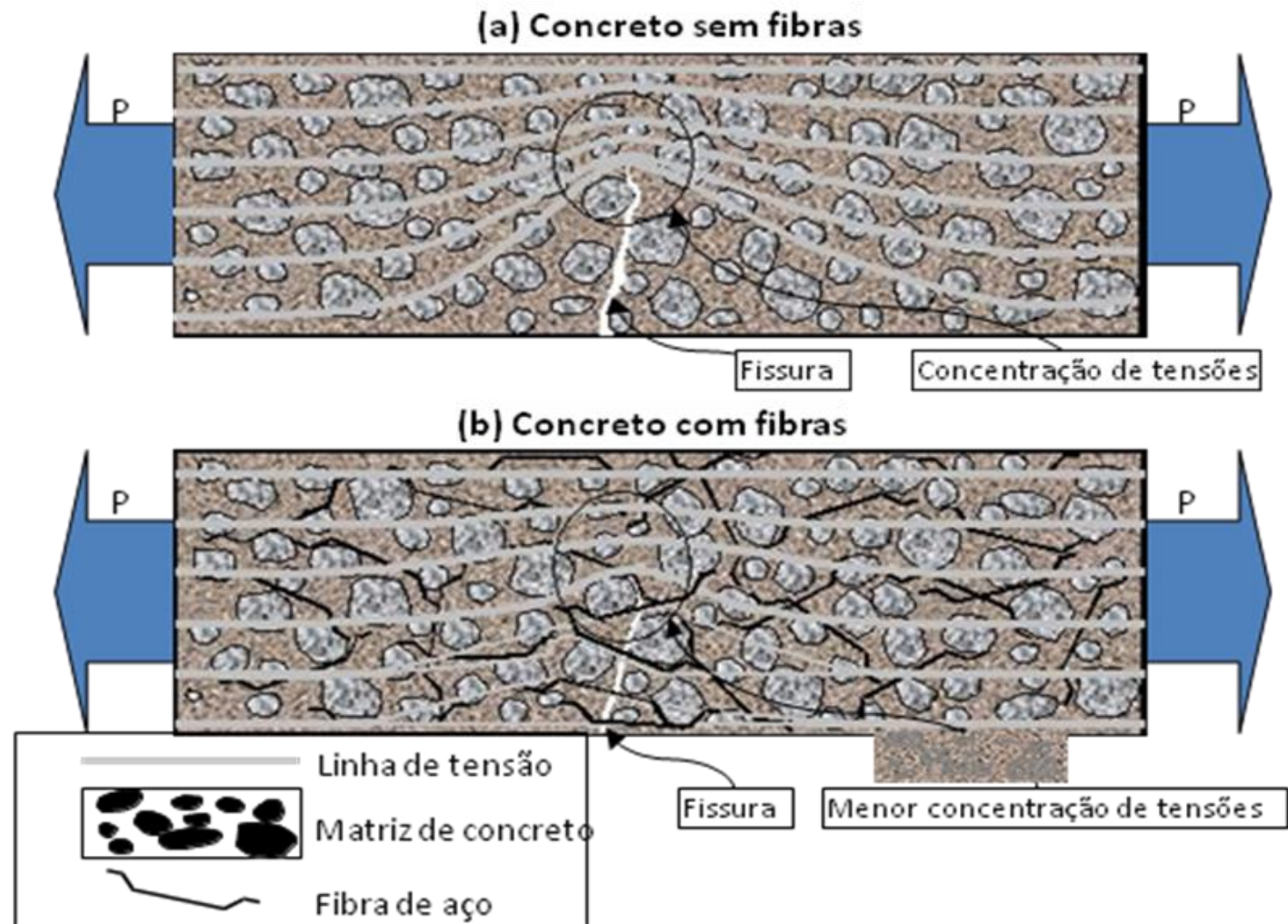


***Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo***

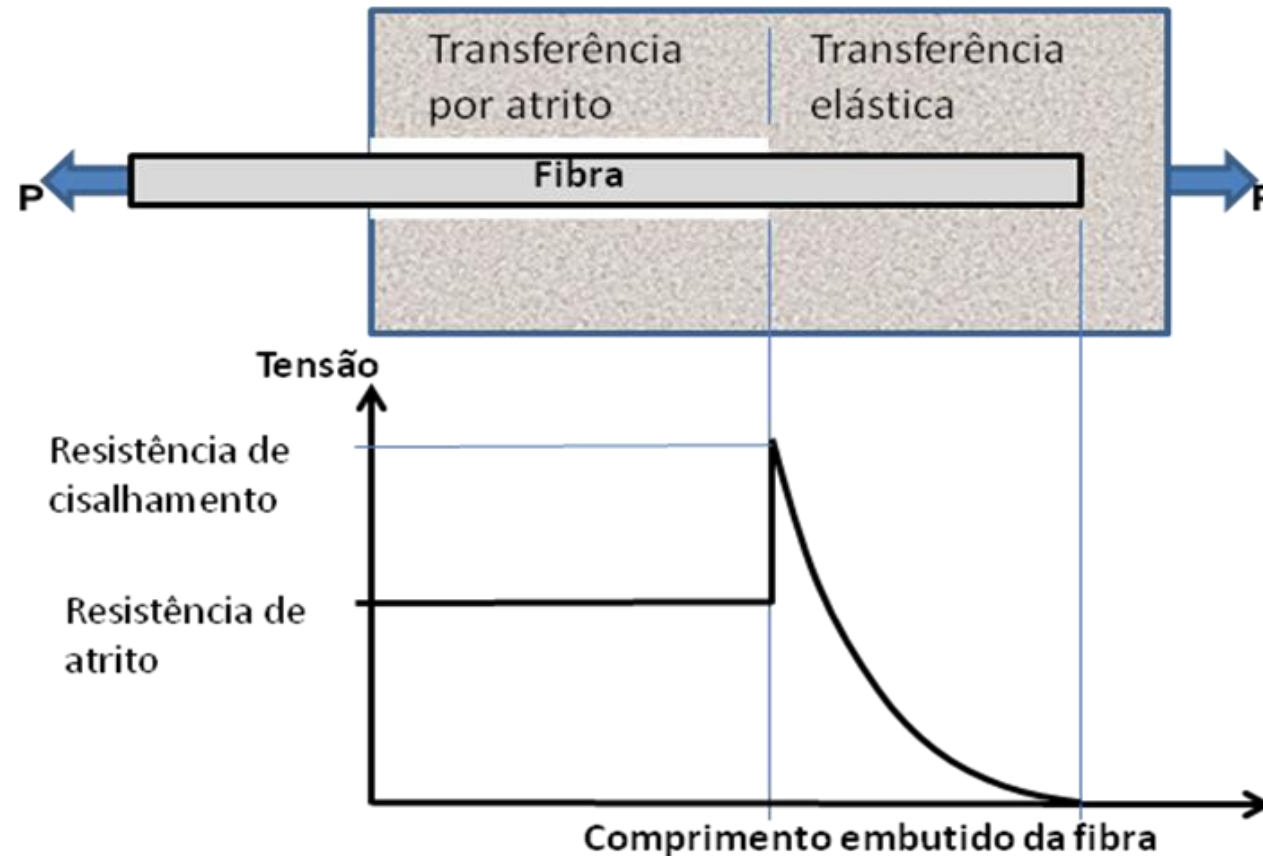
Introdução

- É notório que o concreto apresenta evolução de ganho de resistência com a idade.
- Se um concreto atende ao requisito de resistência à compressão a menores idades se garante que vai superá-lo com o passar do tempo.
- Isto não é sempre válido para outras propriedades como a tenacidade e resistência residual pós-fissuração.

A interação entre fibra e matriz



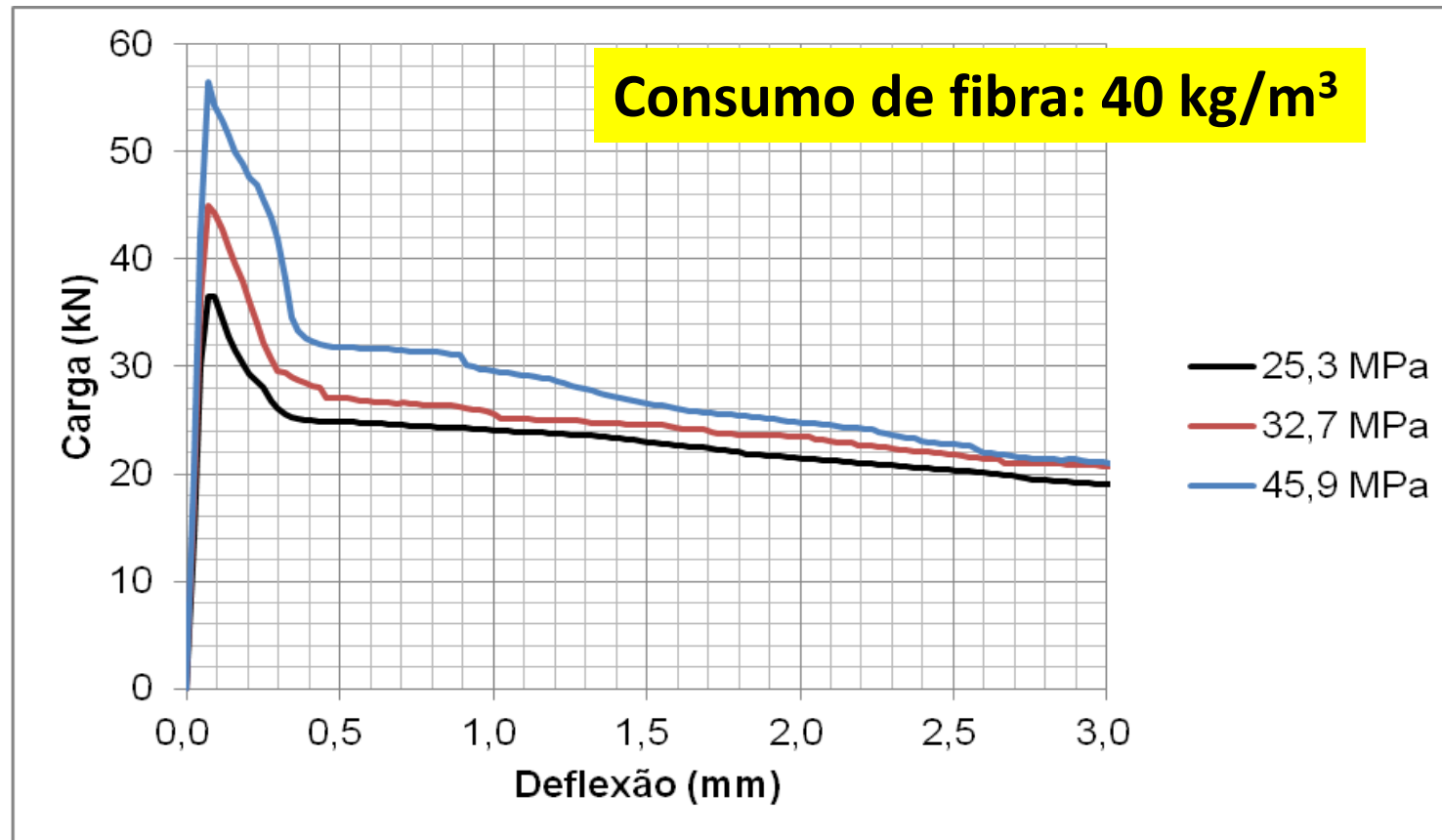
A interação entre fibra e matriz



A capacidade resistente da fibra depende:

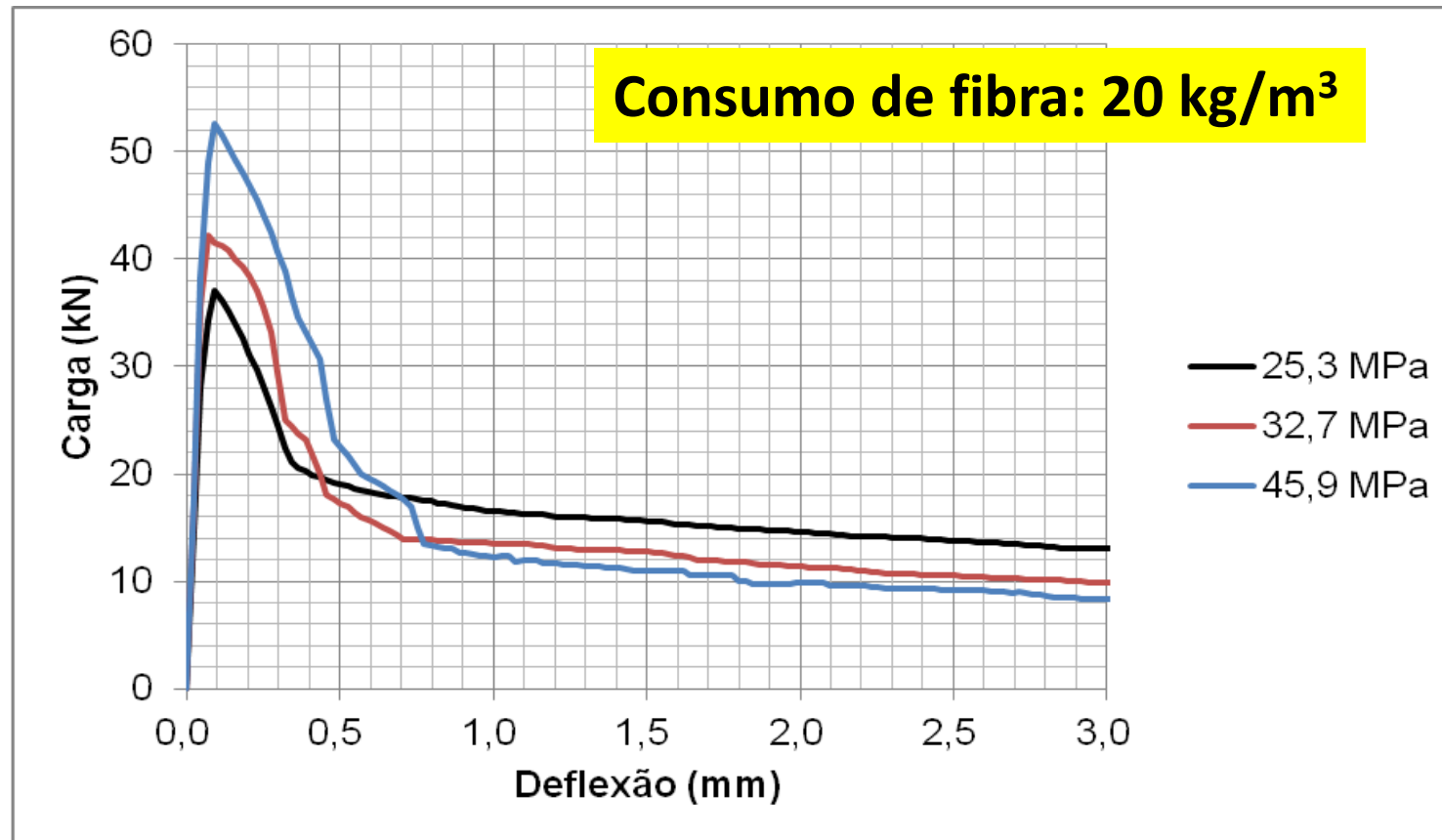
- Do comprimento embutido da fibra.
- Do nível de inclinação da fibra em relação ao plano de fissuração.
- Da resistência da fibra e de seu módulo de elasticidade.
- Da aderência entre fibra e matriz.
- Das condições de transferência de carga da matriz para a fibra.

Comportamento à flexão



Resistência da fibra $f_s = 500$ MPa

Comportamento à flexão

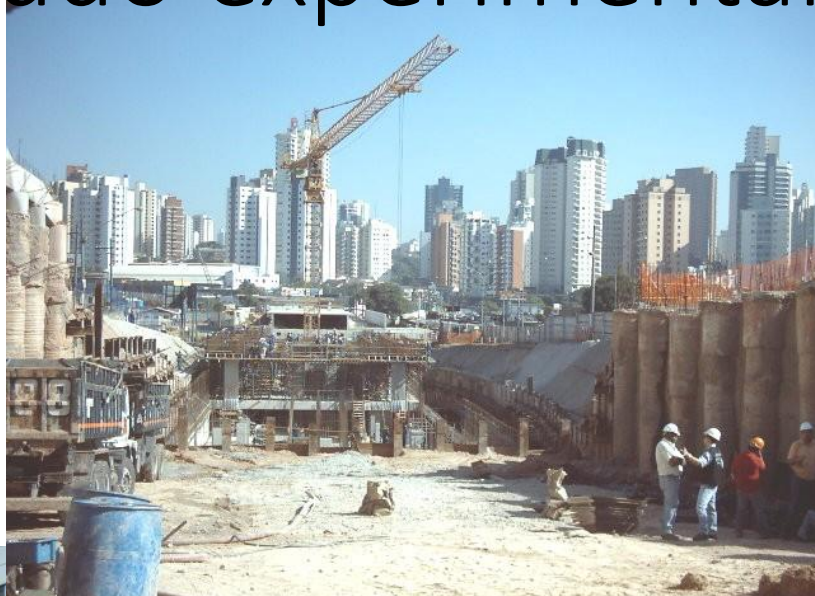


Resistência da fibra $f_s = 500$ MPa

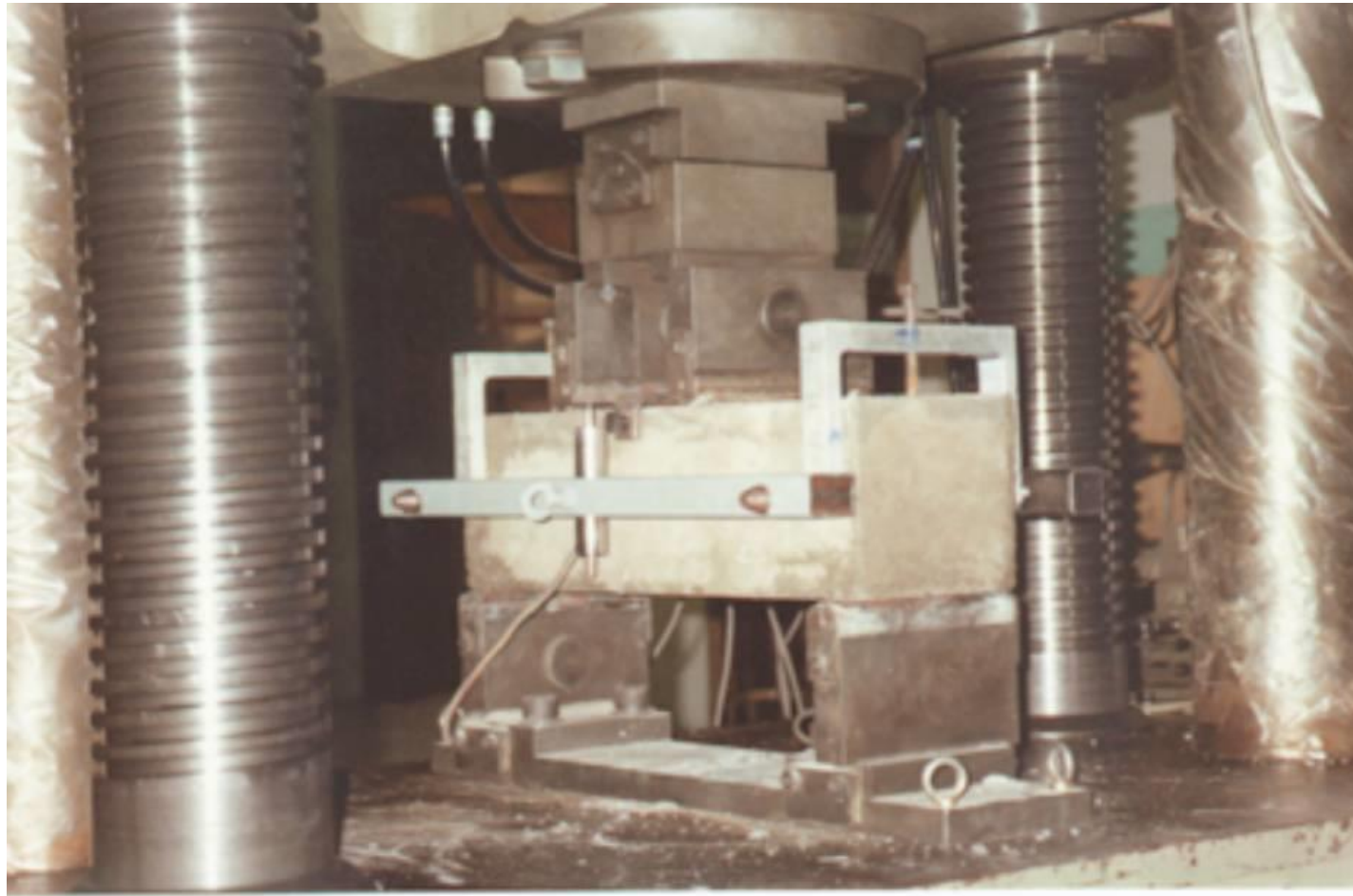
Estudo experimental



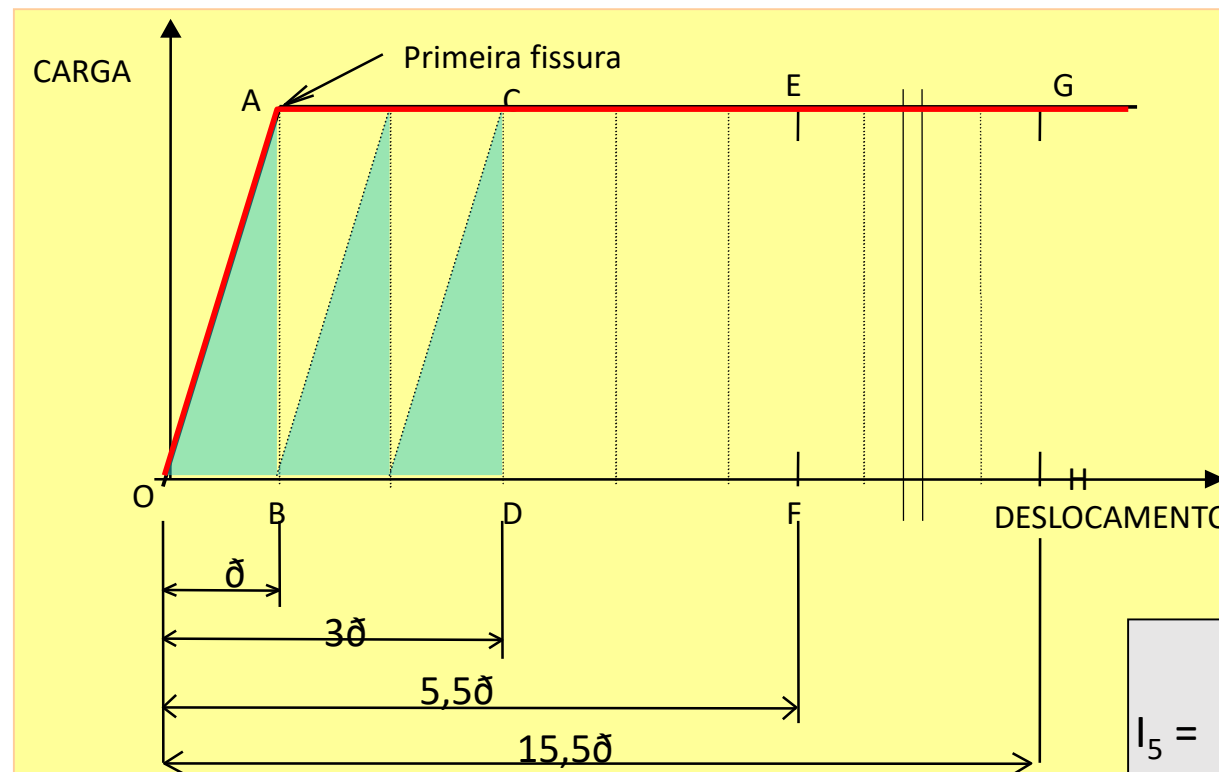
Estudo experimental



Flexão de prismas



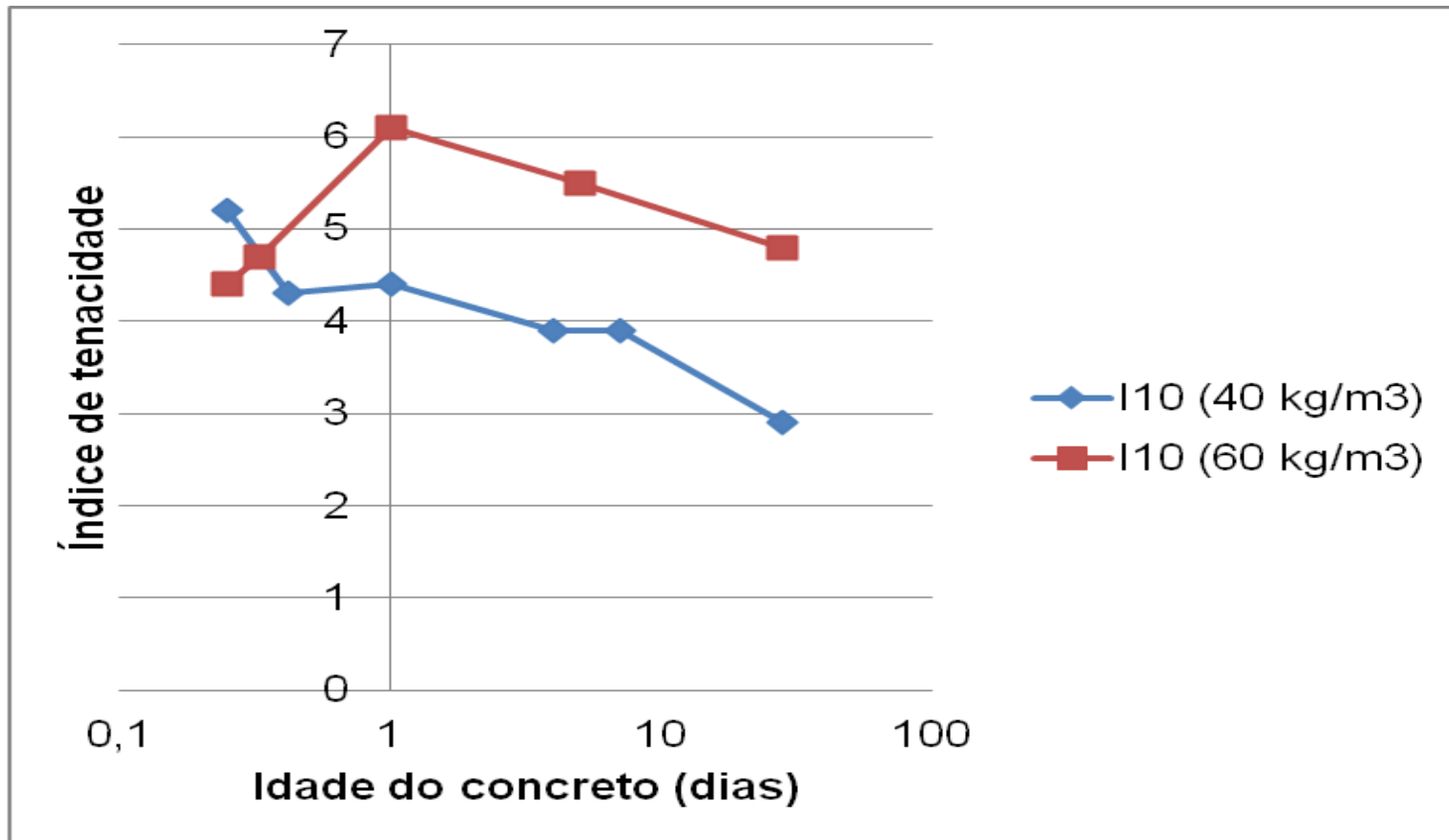
A evolução da tenacidade no concreto projetado nas primeiras idades



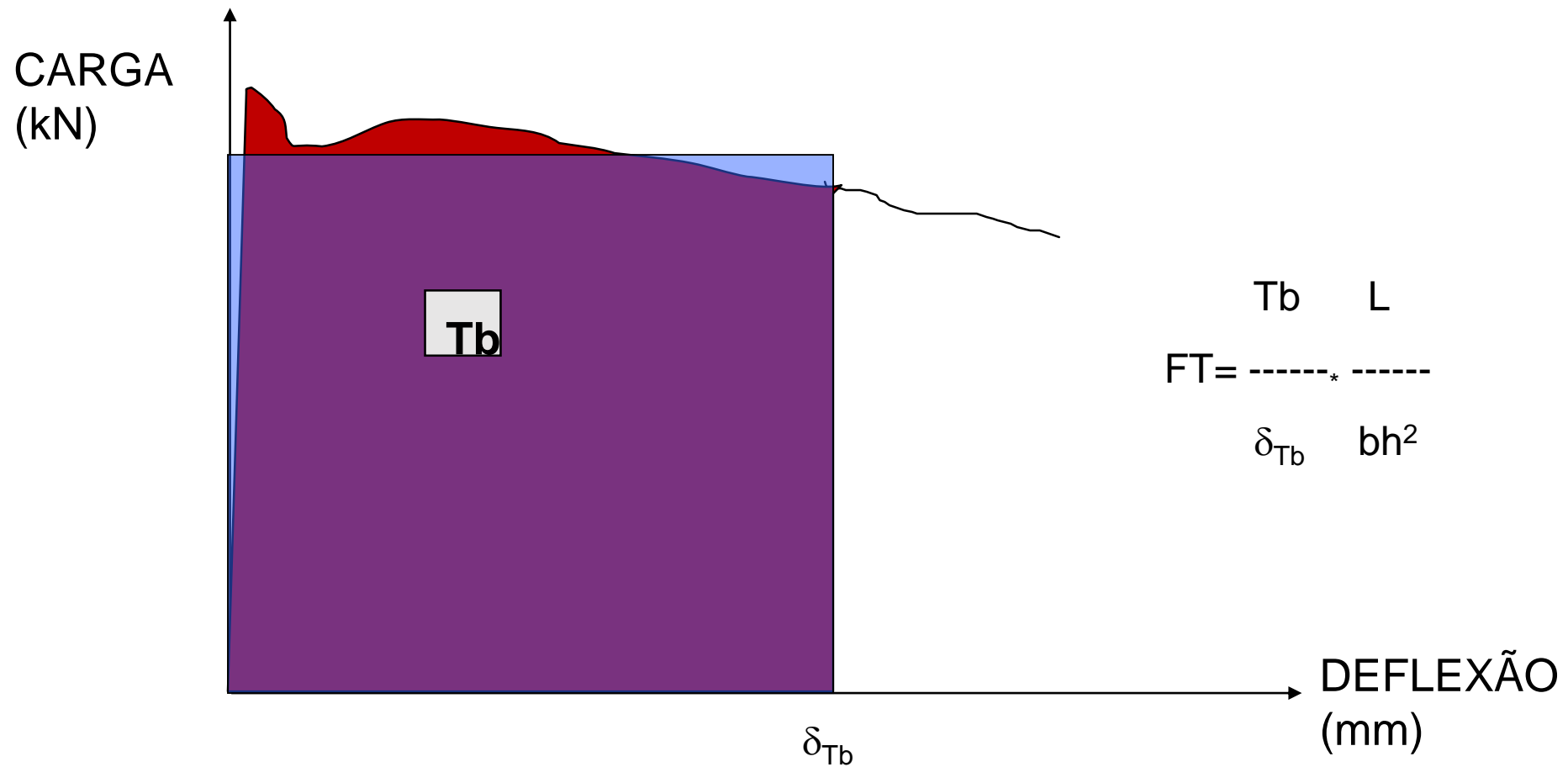
ASTM C1018

$$I_5 = \frac{OACD}{OAB}$$

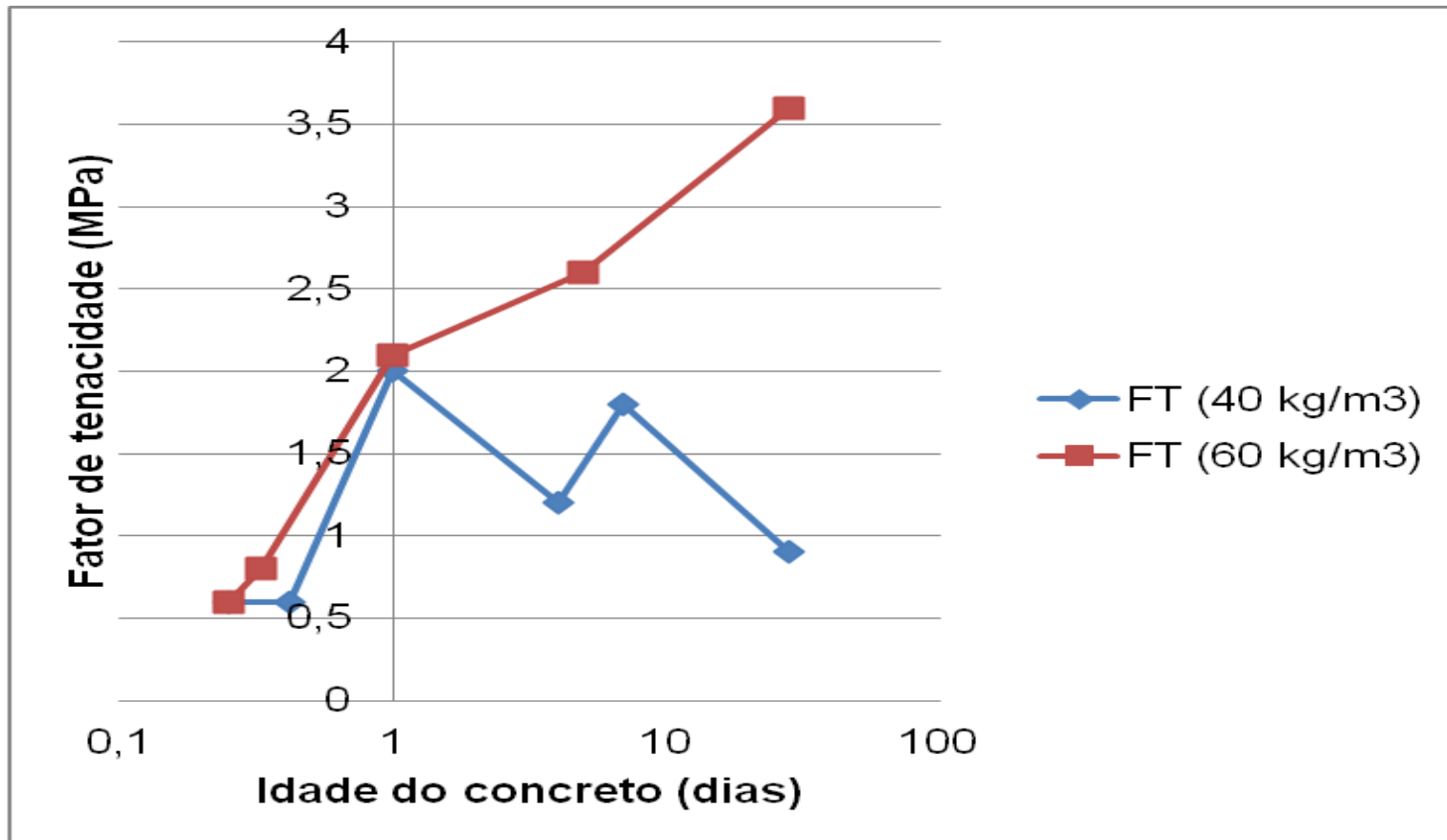
A evolução da tenacidade no concreto projetado nas primeiras idades



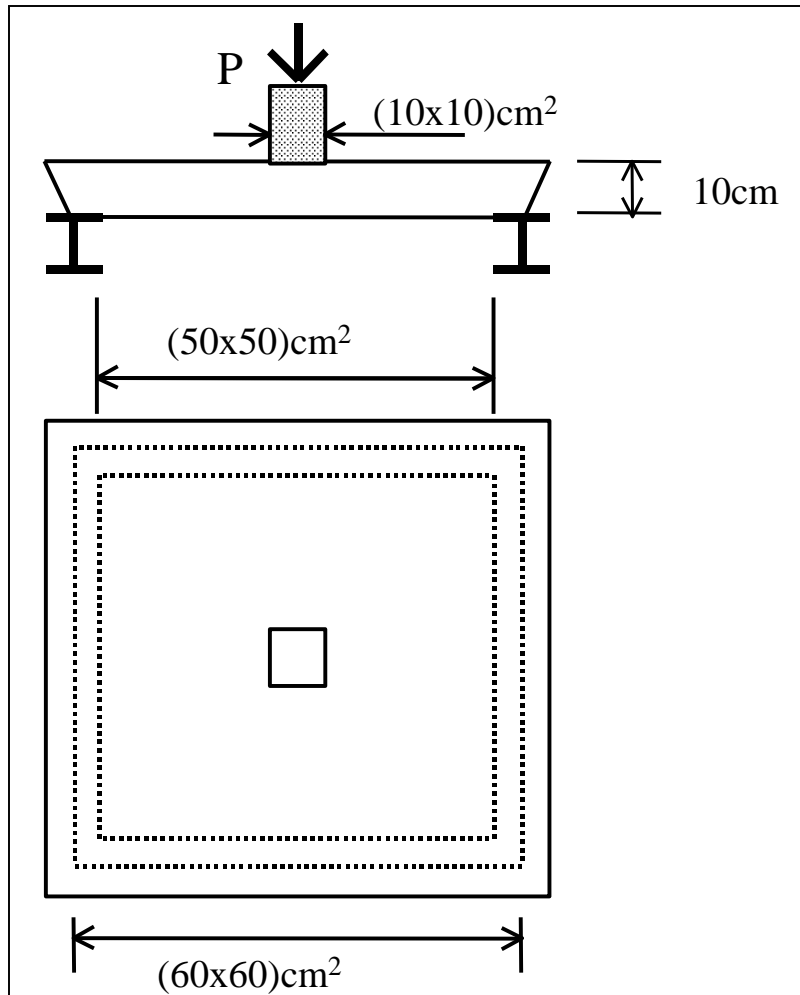
A evolução da tenacidade no concreto projetado nas primeiras idades



A evolução da tenacidade no concreto projetado nas primeiras idades

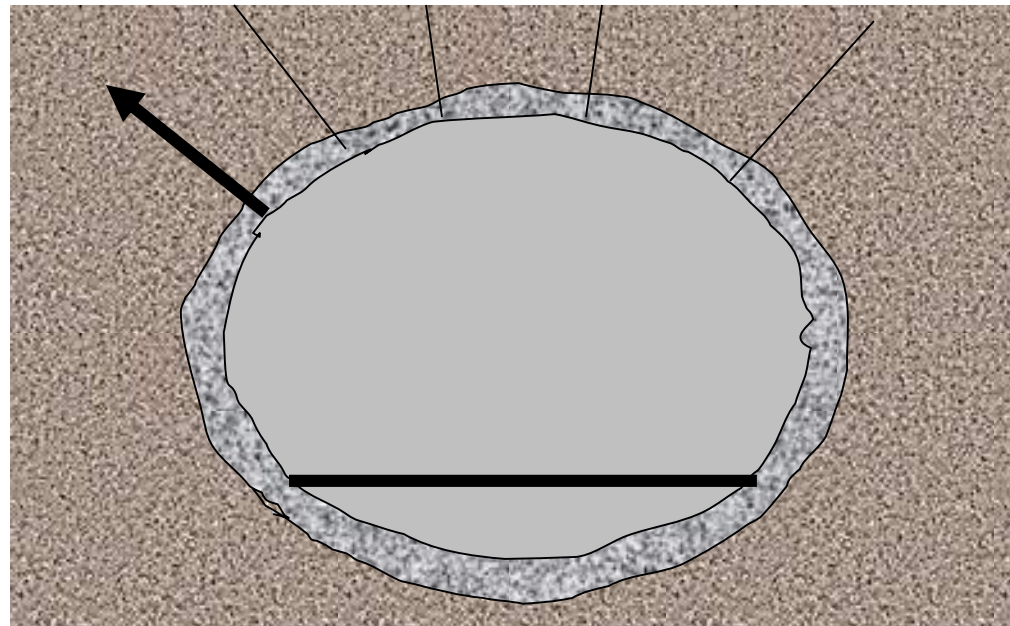


Ensaio de punção de placas



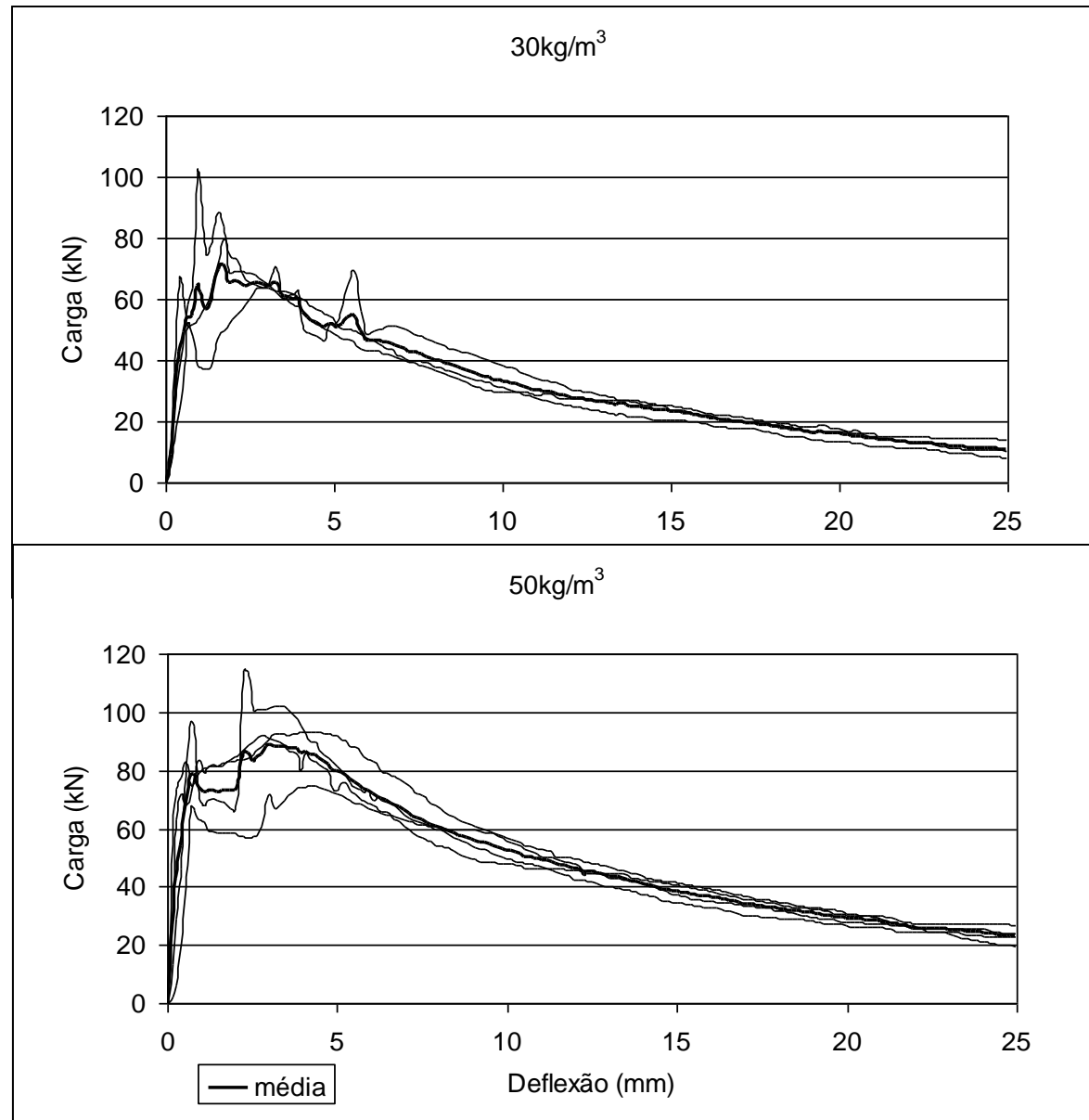
Representa o esforço de um tirante

Permite comparação entre fibras e telas metálicas

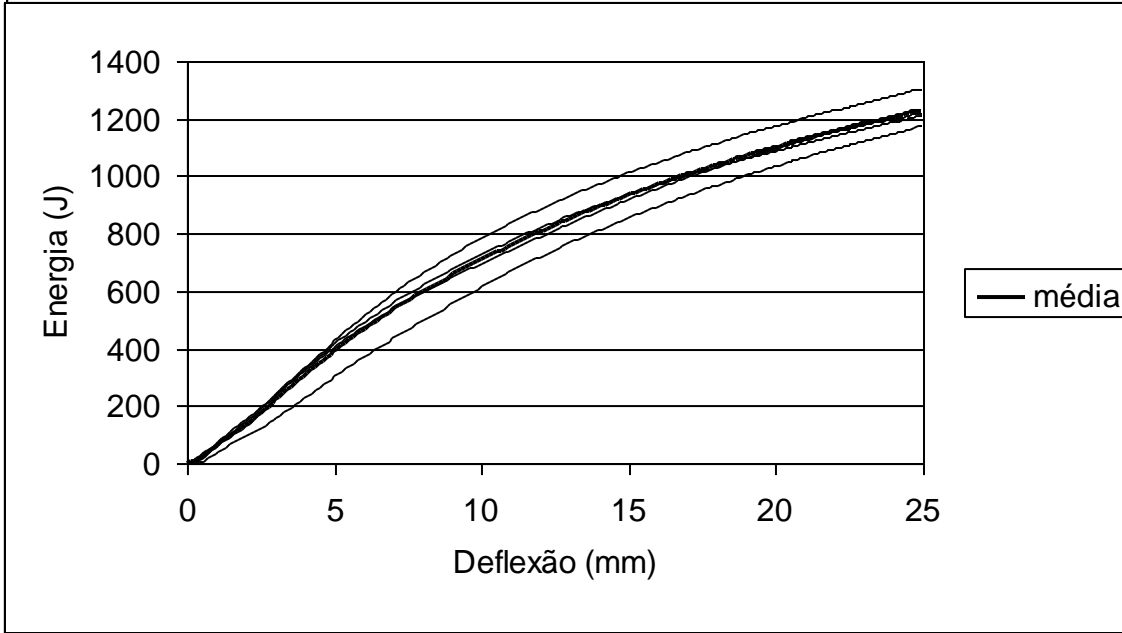




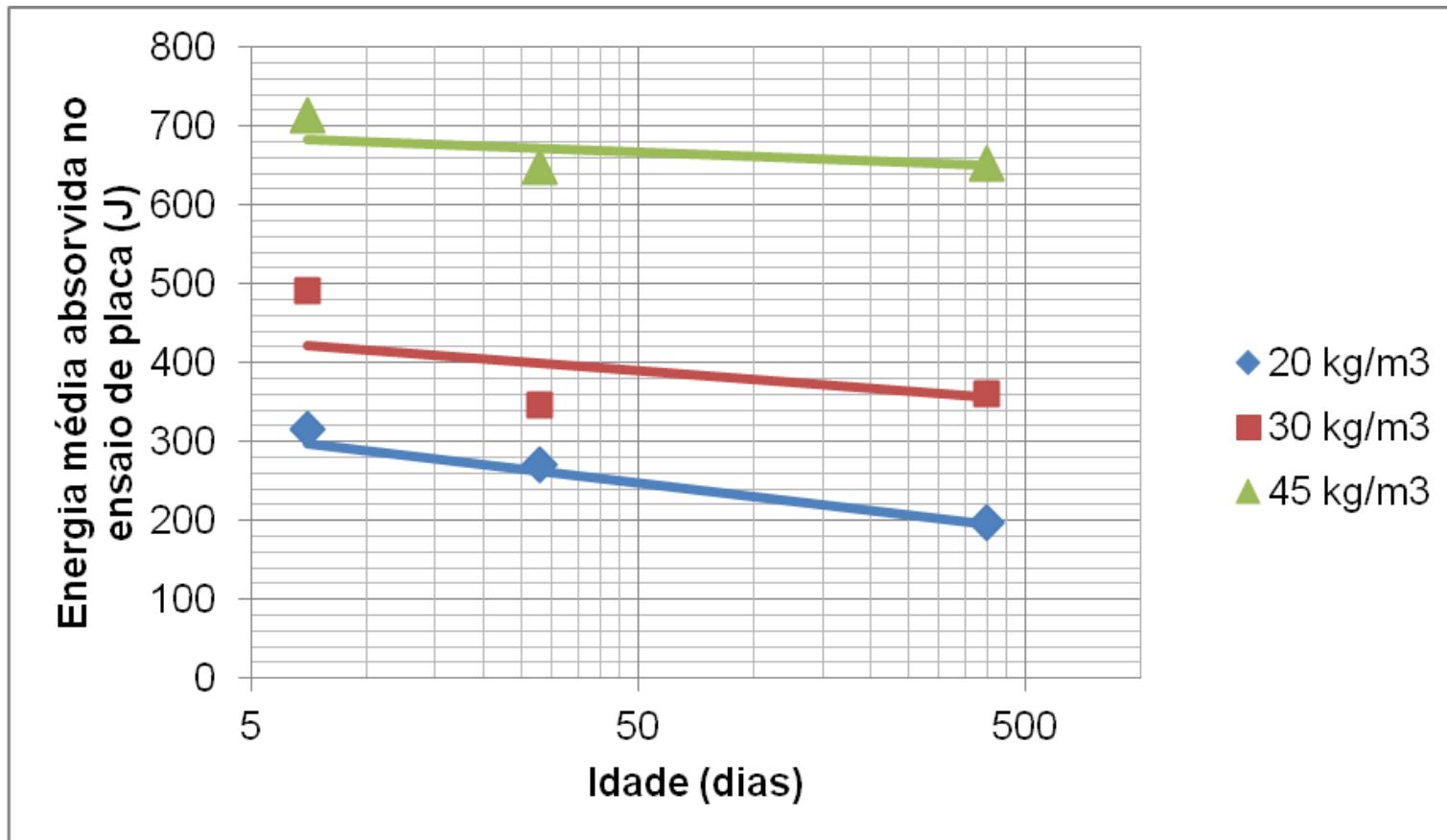
Ensaio de punção de placas



Ensaio de punção de placas



A evolução da tenacidade no concreto projetado nas maiores idades



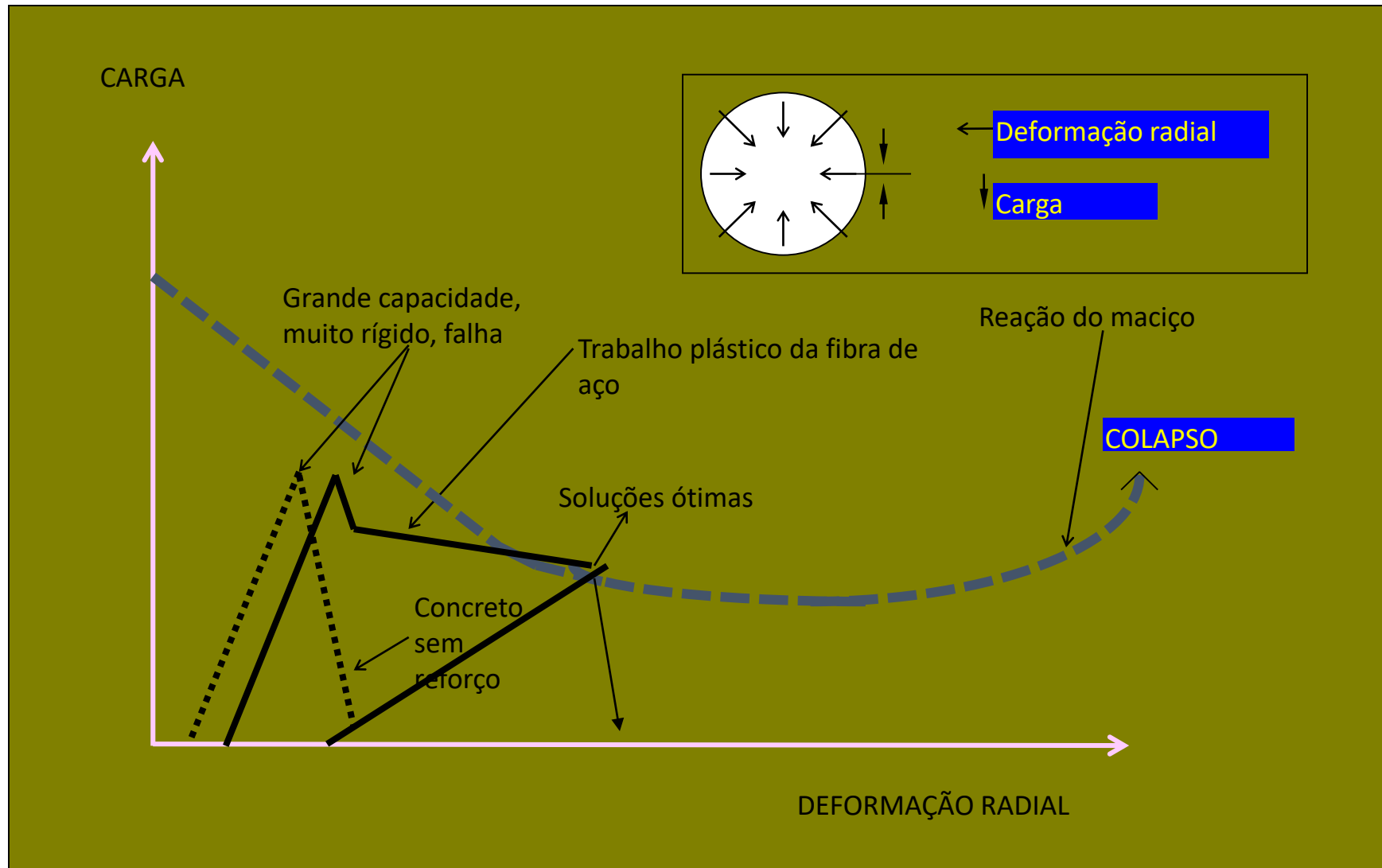
Comentários finais

- Há a possibilidade de perda de resistência residual pós-fissuração com a idade do CPRF com o aumento da resistência do material (**fragilização**)
- Deve-se verificar os parâmetros estabelecidos para o material quanto a este possível risco (**controle**).
- O risco é maior para baixos teores de fibras ou de fibras com menor resistência mecânica.

Comentários finais

- É importante que o projetista analise pelo fato de que nem sempre o maior desempenho deve ser obtido para maiores idades.
- É particularmente importante a ductilização do revestimento do túnel no momento do avanço da escavação pelo processo NATM.
- Isto pode ter transcendência nula para obras existentes.

Modelo (NATM)



Comentários finais

- A fragilização tem muito menor chance de ocorrer para o caso do concreto pré-fissurado:
 - Não é mais possível haver transferência abrupta de tensões
 - Com aumento na tensão de aderência entre fibra e matriz aumentando assim a resistência residual do material.
 - Os estudos aqui apresentados foram feitos com o concreto inicialmente íntegro, onde a tendência de fragilização é muito maior.