



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

Programa de Pós-Graduação

**ENGENHARIA CIVIL**

# PCC-5729 Compósitos de Matrizes Cimentícias Aplicados à Construção Civil

Antonio Figueiredo

Luis Bitencourt

Renata Monte

# Breve histórico

- São utilizados na construção desde a antigüidade - adobe (Êxodo: 5,7).
- Zigurats
- Palha e cabelo tem sido usado por séculos em adobe
- Alfsen patenteou, na França, fibras para aumento da resistência à tração do concreto (1918)
- Martin patenteou fibras de aço lisas e com deformações para reforço do concreto (1926)
- Constantinesco patenteou o uso de fibras em concreto para aumento da tenacidade (1943); aplicações militares e fundações de máquinas industriais



<https://incrivelhistoria.com.br/zigurate/>

## Breve histórico

- Uso não artesanal bem difundido:
  - cimento-amianto (1900).
- Uso disseminado:
  - Poliéster reforçado com fibras de vidro.
- Uso crescente no mercado da construção civil:
  - Concretos e argamassas reforçados com fibras.



# O que é um compósito?

- Caracterizado pela heterogeneidade de elementos; feito de vários elementos ou partes diferentes; composto.
- Materiais compostos por outros materiais com a finalidade de se obter características aprimoradas.
- Classe de materiais compostos por uma fase contínua (matriz) e uma fase dispersa (reforço), contínua ou não, cujas propriedades resultam da combinação das propriedades dos constituintes e sua interação.

# Matrizes principais

- Poliméricas (poliéster, epoxi, etc.)
  - Fibras destinam-se a reforço
- Cimentícias
  - Fibras podem ser utilizadas para reduzir fragilidade e minimizar a limitação da baixa resistência à tração
  - Fibras também podem ser utilizadas como reforço (aumento da resistência à tração)

# Principais fibras

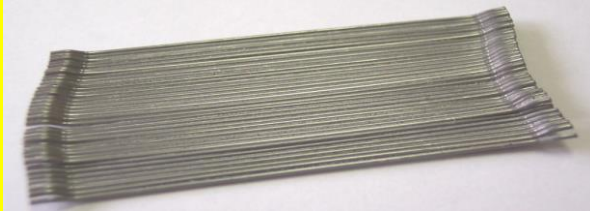
(BENTUR; MINDESS, 1990).

Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-210	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,60	70-80	2-4	2-3,5
Amianto	0,02-0,4	2,6	160-200	3-3,5	2-3
Polipropileno	20-200	0,9	1-7,7	0,5-0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,0
Náilon	–	1,1	4,0	0,9	13-15
Celulose	–	1,2	10	0,3-0,5	–
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietileno	–	0,95	0,3	0,7x10 <sup>-3</sup>	10
Fibra de madeira	–	1,5	71	0,9	–
Sisal	10-50	1-50	–	0,8	3,0
Matriz de cimento (para comparação)	–	2,50	10-45	3,7x10 <sup>-3</sup>	0,02



# Muitas fibras disponíveis no mercado

ABNT NBR 15530 (2007).



# Fibras Sintéticas

- Polipropileno, nylon, polietileno, etc.
  - Podem substituir o amianto: sistema de múltiplas camadas (polipropileno).
  - Controle de fissuração nas primeiras idades do concreto (polipropileno e nylon).
  - Atuam como reforço principal (macrofibras)
  - Anti-spalling.



# Fibras de carbono

- Principal aplicação: reforço de estruturas
- Aplicadas em matrizes poliméricas (termofixas)
- Atuam como reforço básico.
- Apresentam elevada resistência e módulo de elasticidade.
- São fibras frágeis
- Alto custo.



# Fibras de vidro

- Alto módulo e resistência, mas frágeis
- Reforço de matrizes cimentícias para controle de fissuração inicial e reforço principal.



<http://www.grcterrafirma.com/panel.html>

# Fibras de aço

- Reforço mais comum de concretos endurecidos
- Produção nacional em grandes volumes
- Evolução rápida no exterior e lenta no Brasil
- Base da maioria das pesquisas e da normatização internacional para o uso do CRF como material estrutural.



# Principal foco da disciplina

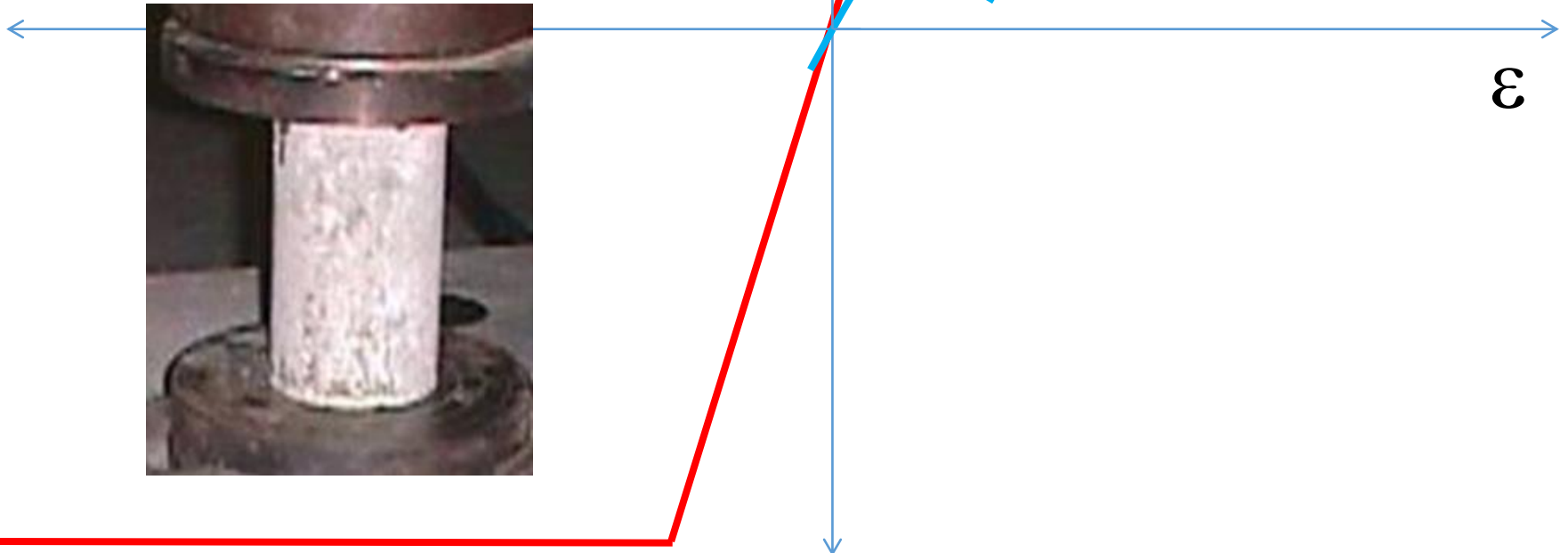
- Concreto com fibras (“concreto reforçado com fibras”)
- Suas aplicações de engenharia

# Pontos fundamentais

- O concreto possui uma série de características que lhe garantem o posto de material estrutural mais utilizado no mundo.
- Apresenta também limitações:
  - comportamento marcadamente frágil
  - resistência à tração é muito reduzida quando comparada à sua resistência à compressão
  - baixa capacidade de deformação do material antes da ruptura
- Alternativas técnicas: concreto armado e o uso de fibras.

# Diferentes matrizes de concreto

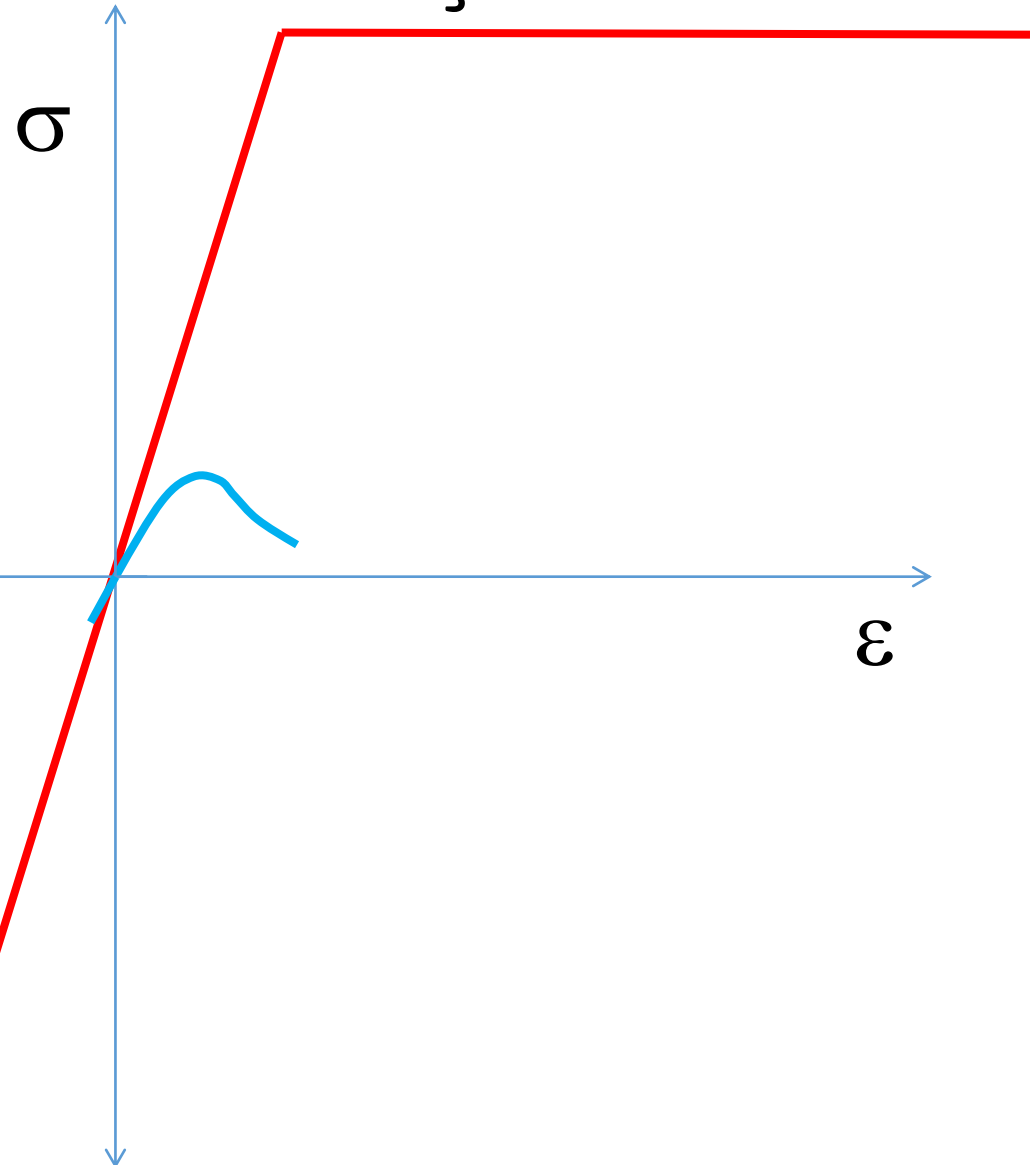
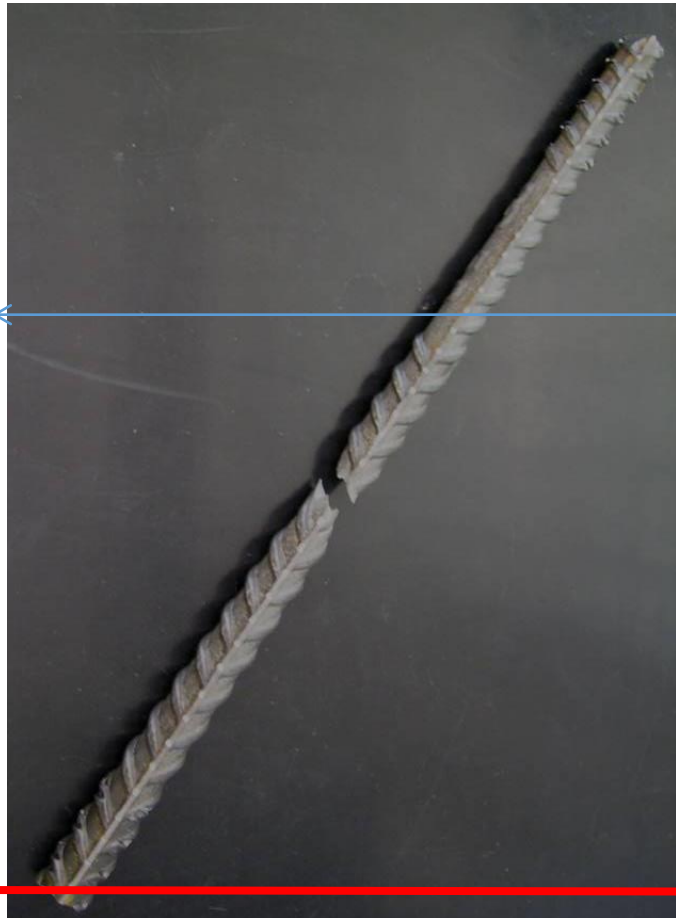
- Baixa resistência
- Média resistência
- Alta resistência





O aço é mais rígido e resistente à tração

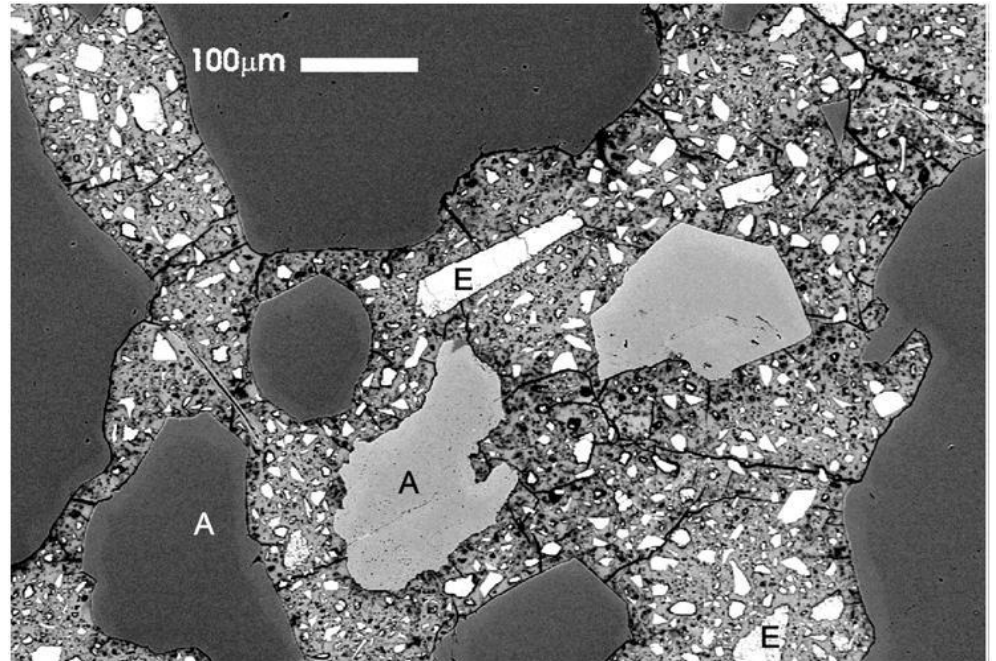
- Concreto armado



Por que a resistência do concreto à tração é muito menor que a resistência à compressão?

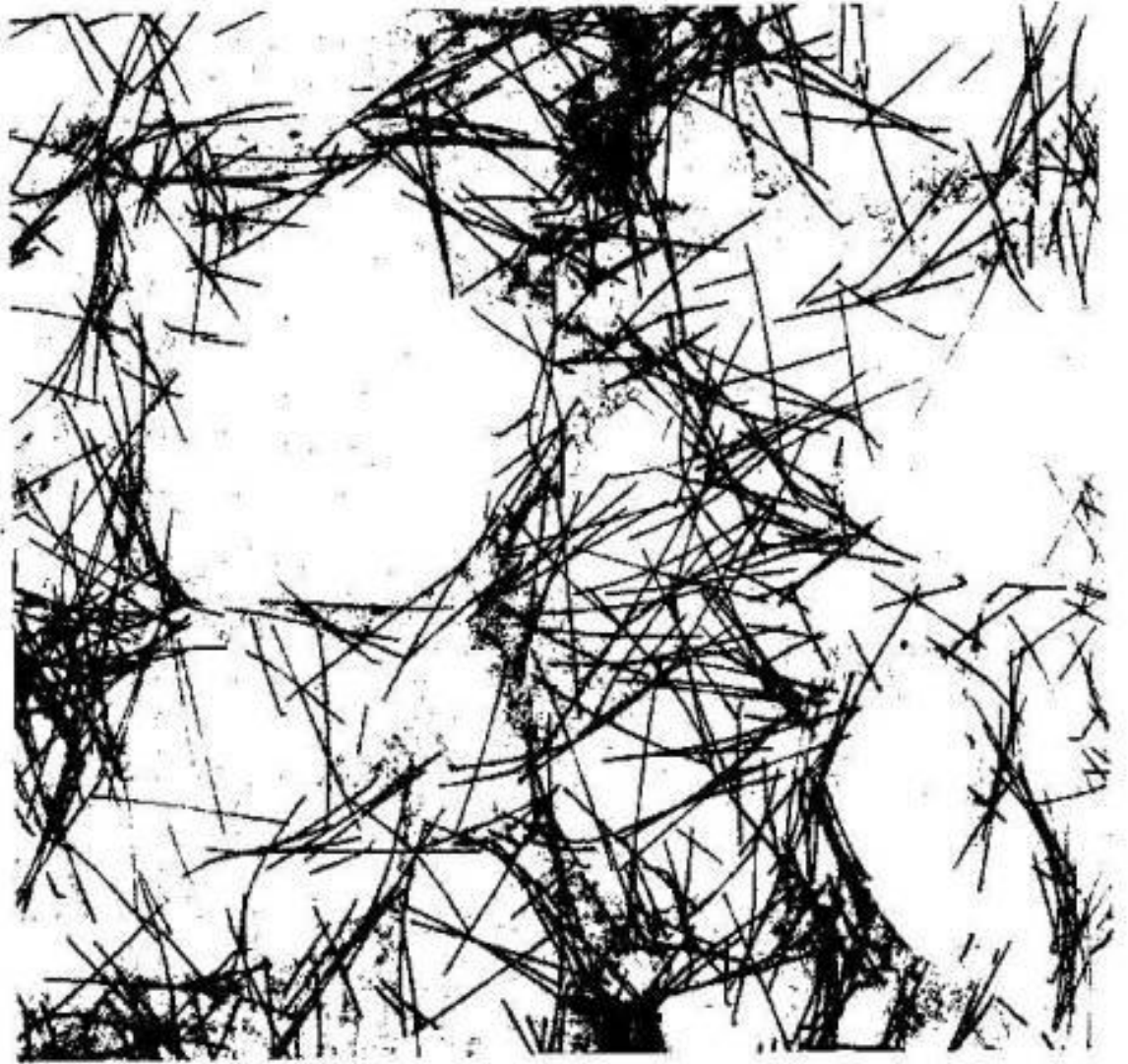
# A matriz de concreto

- Comportamento marcadamente frágil na tração
- Baixo nível de capacidade de deformação
- Defeitos



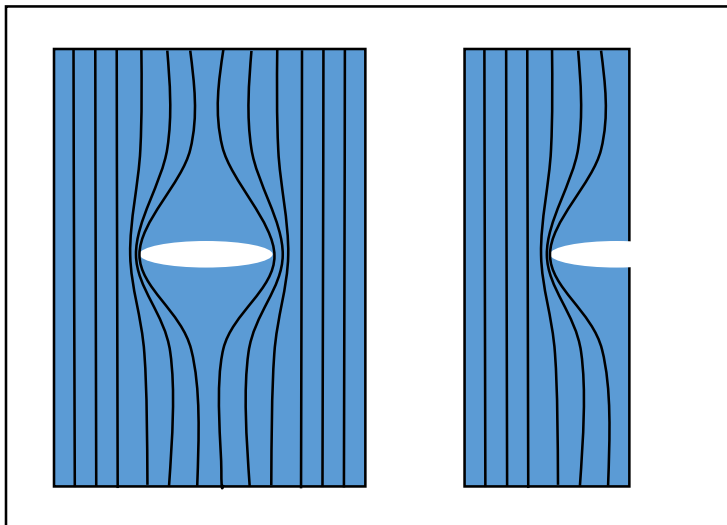
# Disposição das fibras:

Concentradas  
na argamassa  
do concreto



# Concentração de tensões

- A ocorrência de singularidades ou falhas internas ou externas irão impor uma concentração de tensões
- Isto ocorre principalmente para tensões de tração



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

Onde,

$\sigma_m$  = tensão na extremidade da fissura

$\sigma_0$  = tensão de tração aplicada no material

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

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

# Concentração de tensões

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

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

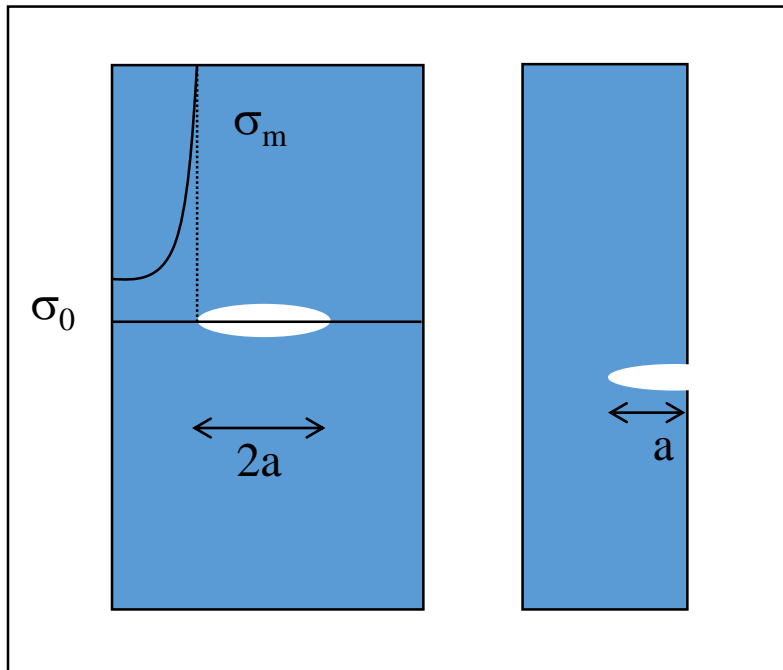
Onde,

$\sigma_m$  = tensão na extremidade da fissura

$\sigma_0$  = tensão de tração aplicada no material

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

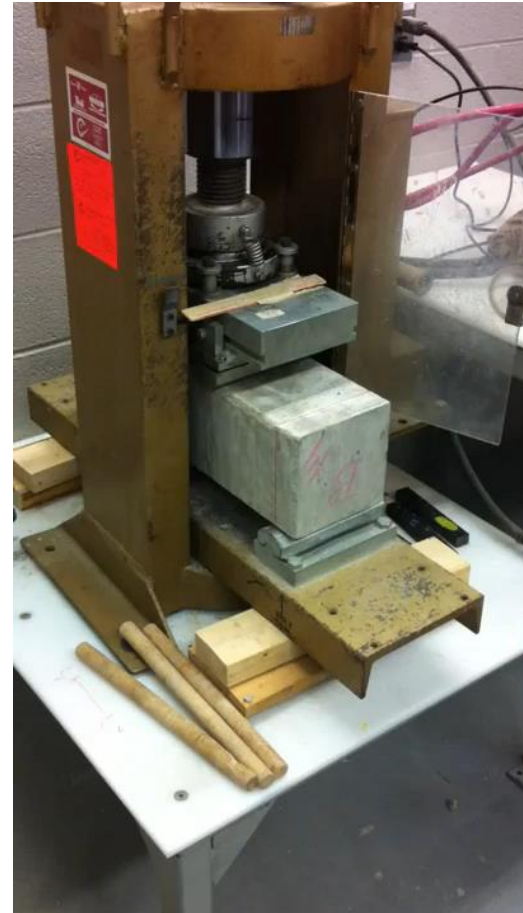
$\rho_e$  = raio de curvatura da extremidade da fissura



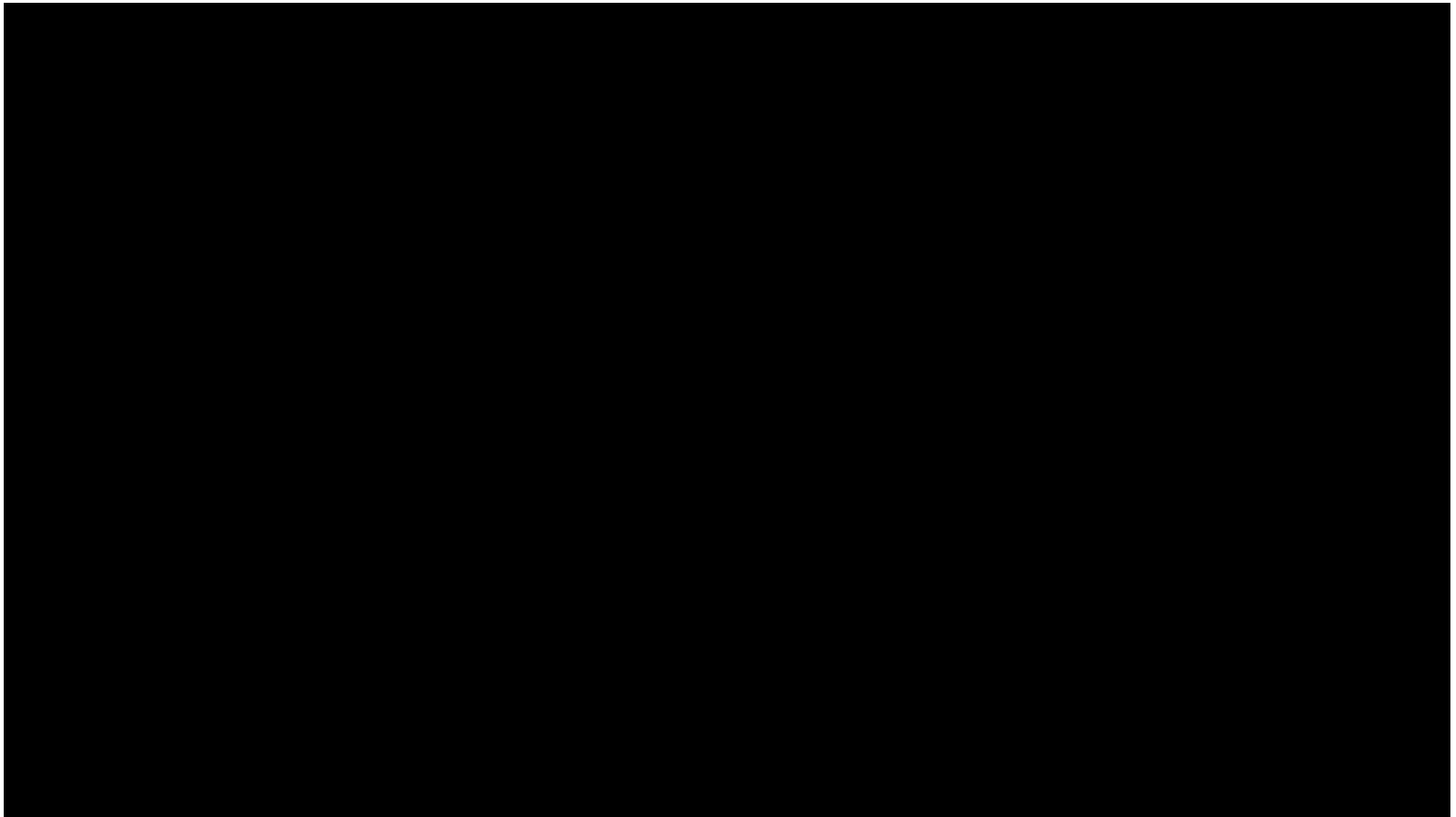


# Fratura em materiais frágeis submetidos a esforços de tração

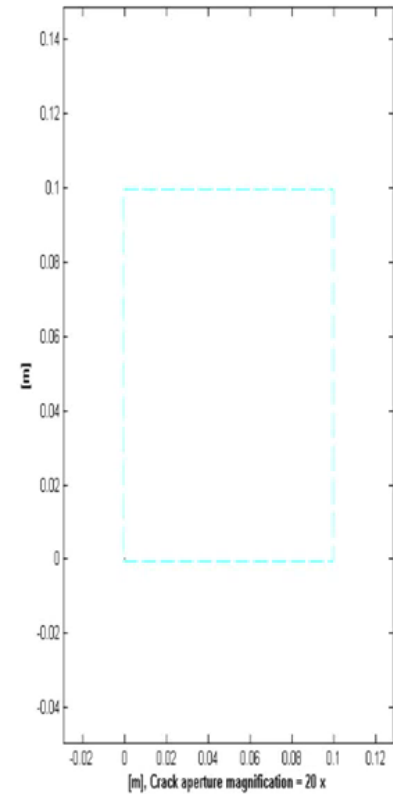
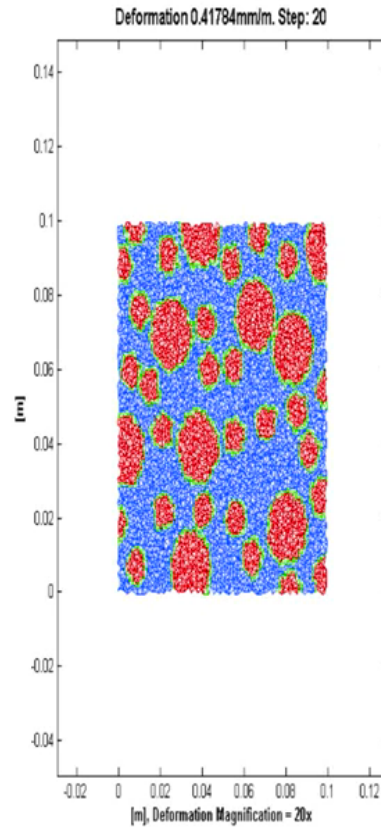
- Quando  $\sigma_m$  superar a tensão de propagação da fissura: em qualquer que seja o ponto a ruptura do material é imediata
- Quanto menor o número de defeitos, maior será a resistência à fratura do material



O comportamento do concreto é igualmente frágil na compressão?

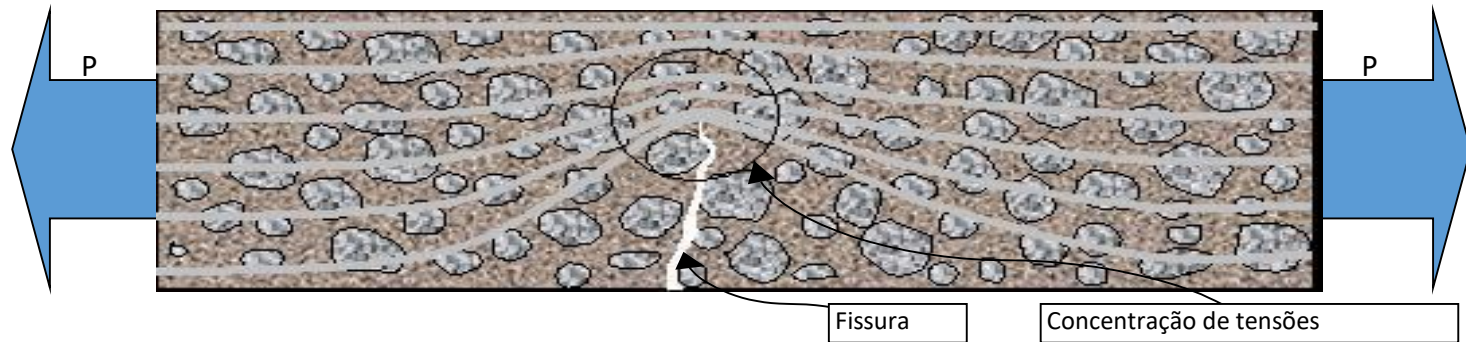


A forma com que o dano é propagado na compressão é distinta da tração.

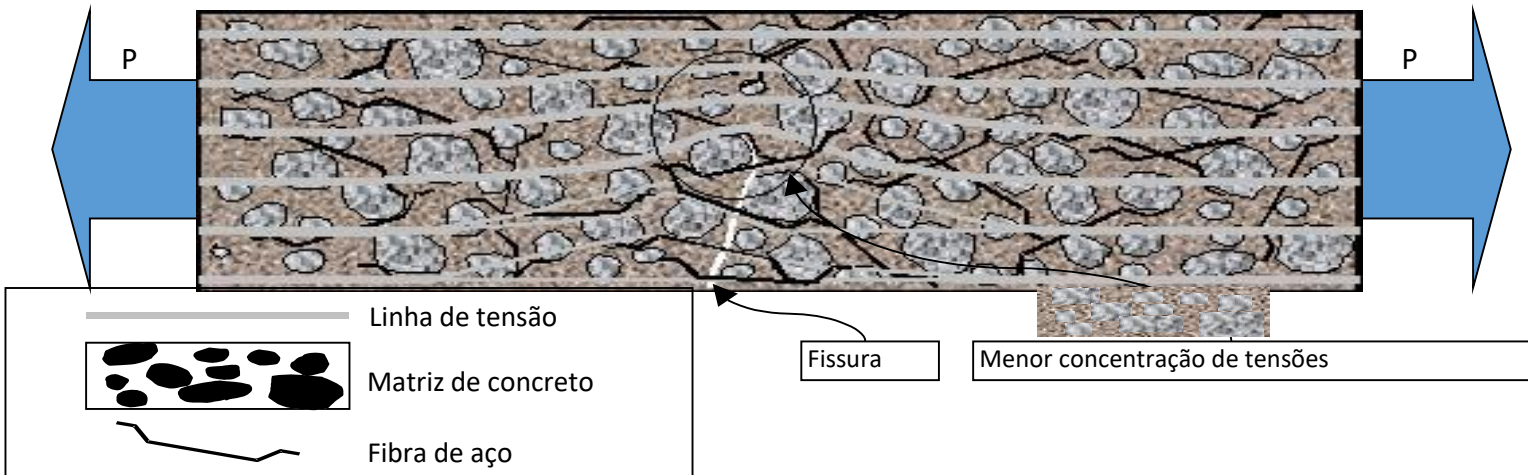


# A interação Fibra X Matriz

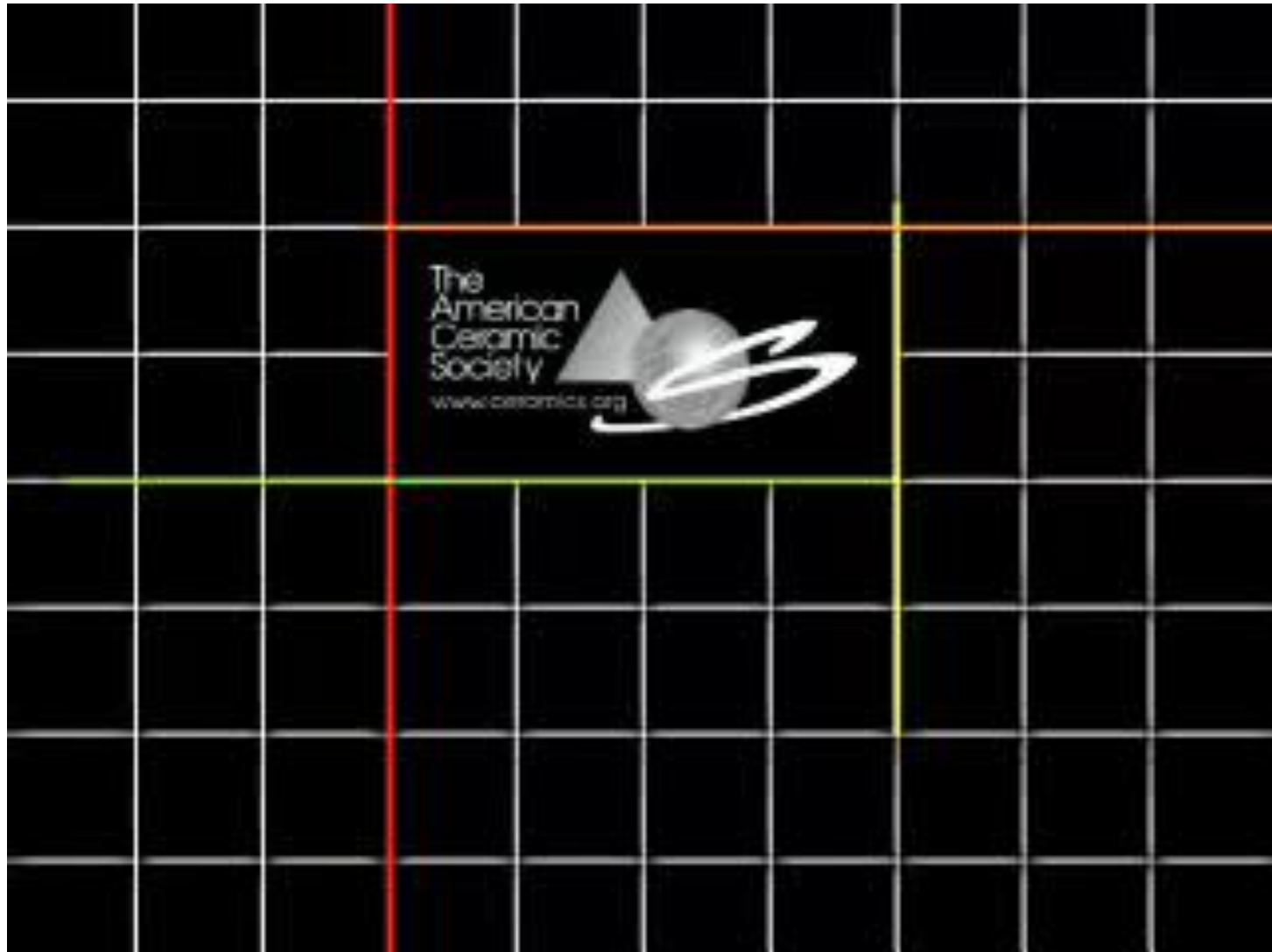
(a) Concreto sem fibras



(b) Concreto com fibras



Há outras possíveis combinações de comportamento?



# Todas as fibras funcionam da mesma maneira?

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



# Aplicação de engenharia dos compósitos:

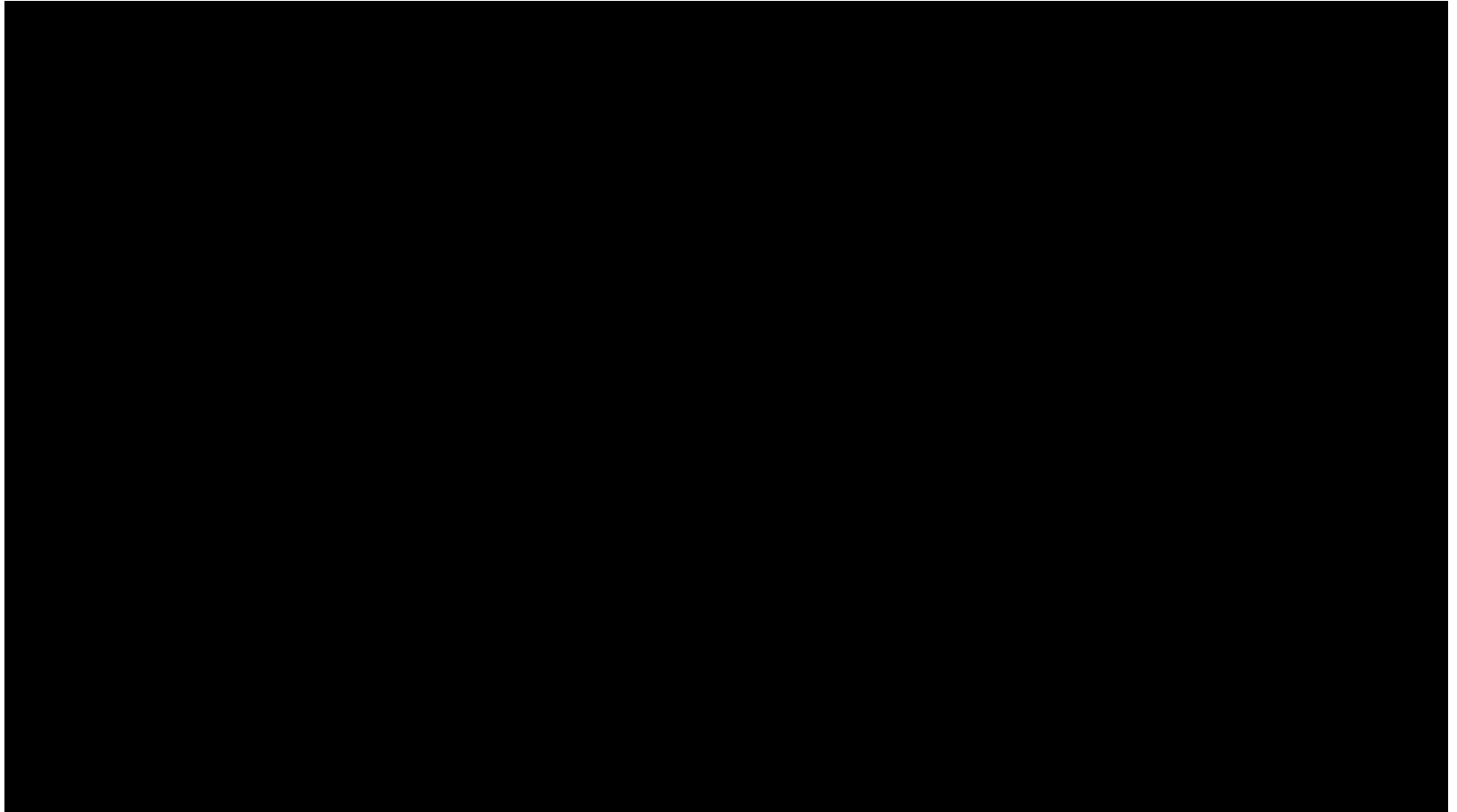
- Para que as fibras sejam aplicadas de modo eficaz deve-se ter domínio dos conceitos básicos de engenharia: fundamentos de engenharia não podem ser substituídos por meras receitas empíricas.
- A tomada de decisão deve ser fundamentada nos critérios de engenharia: técnicos, econômicos, sociais, ambientais, etc.
- Primeiro passo: domínio técnico.

# Consequências do uso das fibras

- Controle da fissuração da matriz.
- Redução da fragilidade do material compósito.
- Aumento da resistência à fadiga.
- Aumento da resistência ao impacto (absorção de energia).
- Facilidade construtiva (elimina etapas da produção/instalação da armadura convencional).
- Melhora a durabilidade.



# Ruptura do concreto armado convencional



O concreto com fibras no ensaio de flexão de prismas:

파워메쉬-SF(Structural synthetic fiber)



**Plain concrete**  
**VS.**  
**POWERMESH-SF concrete**

나이콘소재(주)      [www.nycontech.com](http://www.nycontech.com)

# A redução da fissuração

- Aumenta a resistência à fadiga ou à propagação de dano
- Aumenta a resistência ao impacto
- Proporciona melhores condições de durabilidade
  - Redução da permeabilidade
  - Redução da entrada de agentes agressivos

# Durabilidade

- Ocorrem dúvidas frequentes devido à observação de fibras de aço oxidadas na superfície de pavimentos e túneis:
  - A corrosão das fibras na superfície do concreto está associada à carbonatação do concreto.
  - O volume de óxidos gerados não é suficiente para produzir o lascamento da superfície





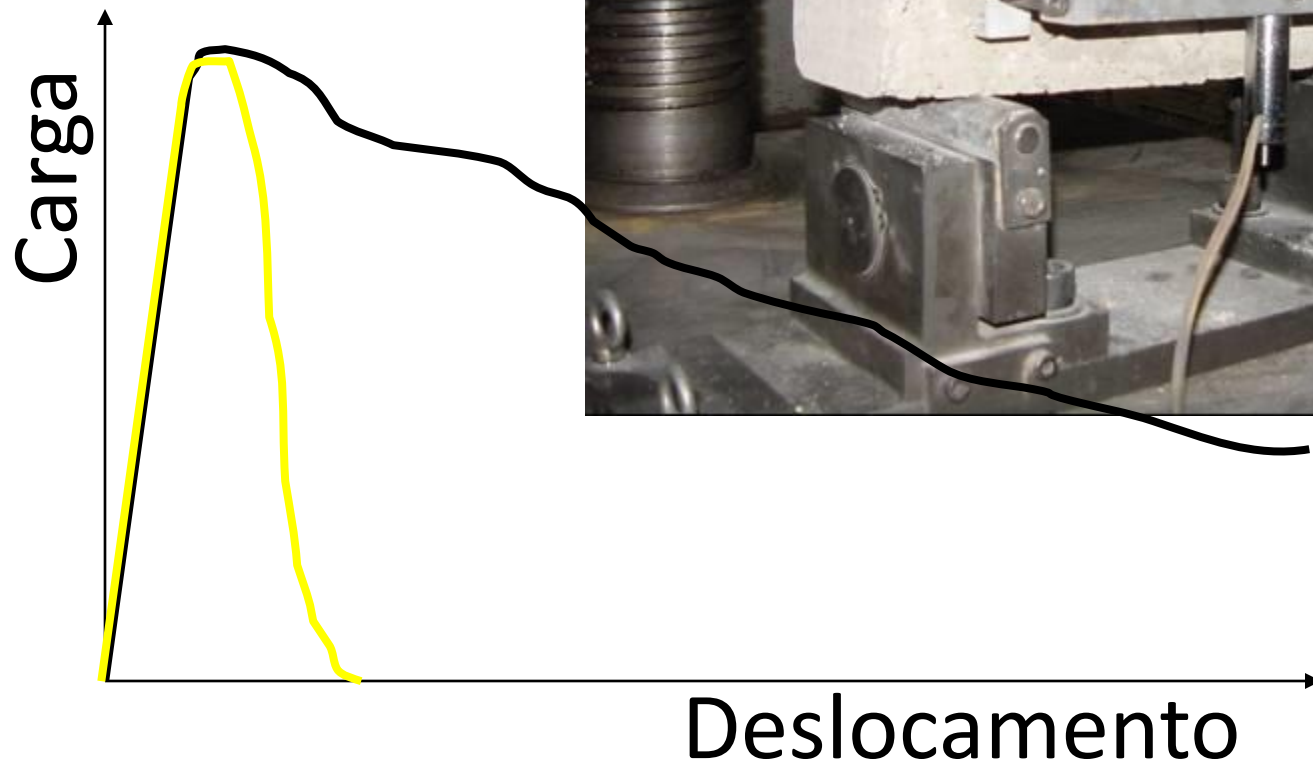
# Durabilidade

- Corrosão da fibra de aço é mais difícil:
  - Menor diferença de potencial
  - Pesquisas indicam que o desempenho do concreto reforçado com fibras é superior ao convencional, seja com ataques severos de cloretos, seja por efeito de congelamento. (Bentur & Mindess, 1990)
  - Mesmo com o concreto fissurado ( $a < 0,2\text{mm}$ ), a fibra apresenta uma capacidade resistente à corrosão (Chanvillard, Aitcin & Lupien, 1989).
  - Não há modelos de previsão de comportamento.

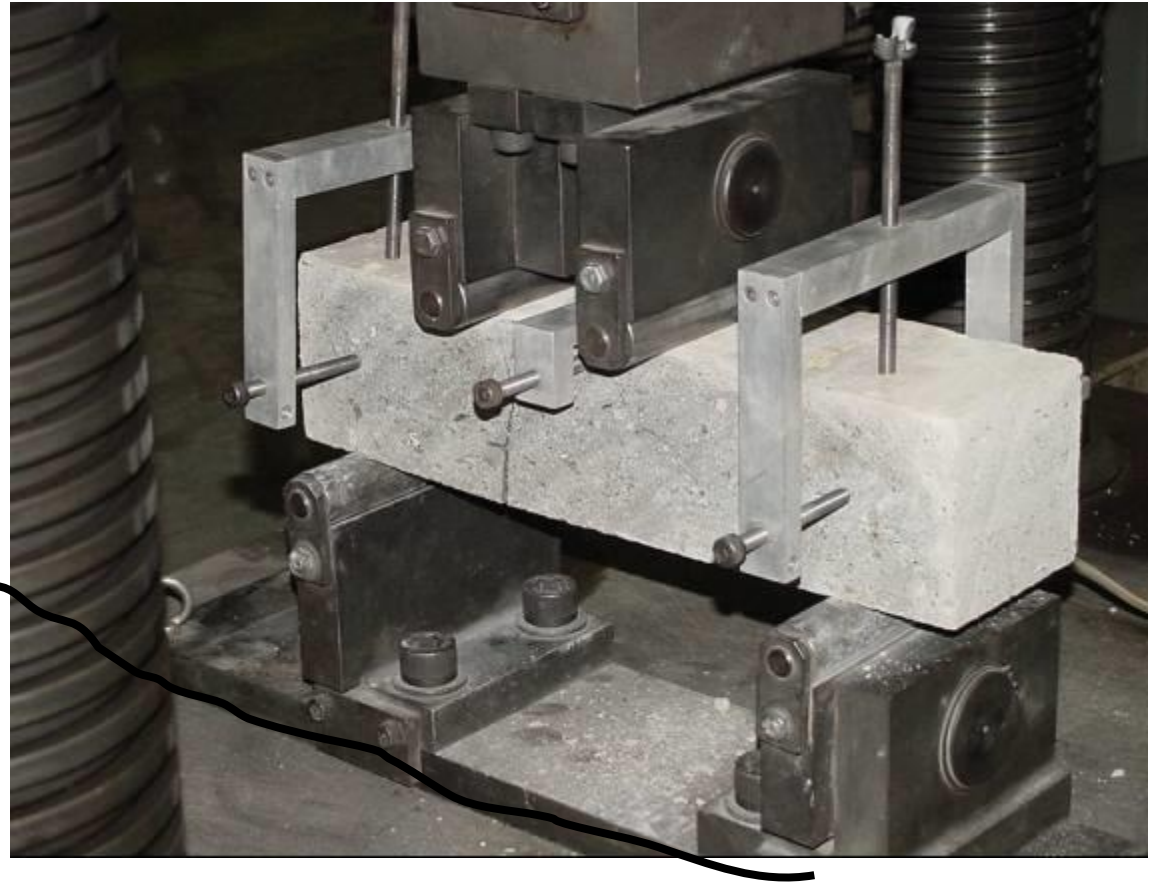
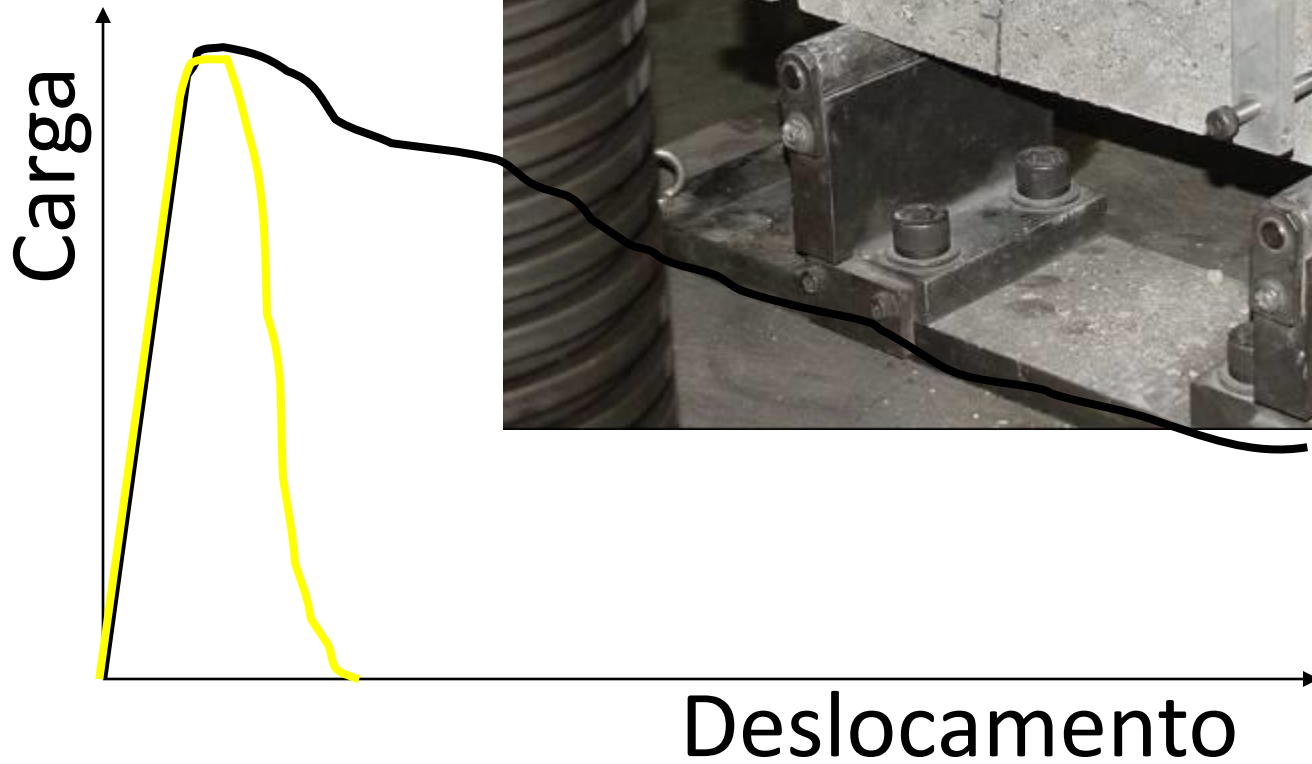
# Tenacidade: aumento da energia de fratura

- Concreto pseudo-dútil
  - Capacidade resistente residual pós-fissuração
  - Múltipla fissuração (volumes maiores)

# Tenacidade



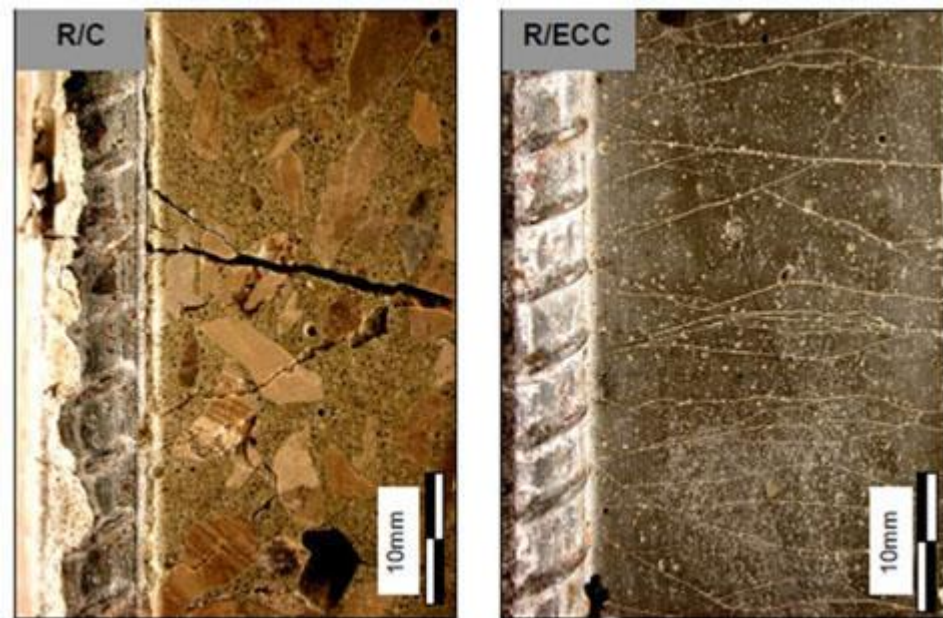
# Tenacidade



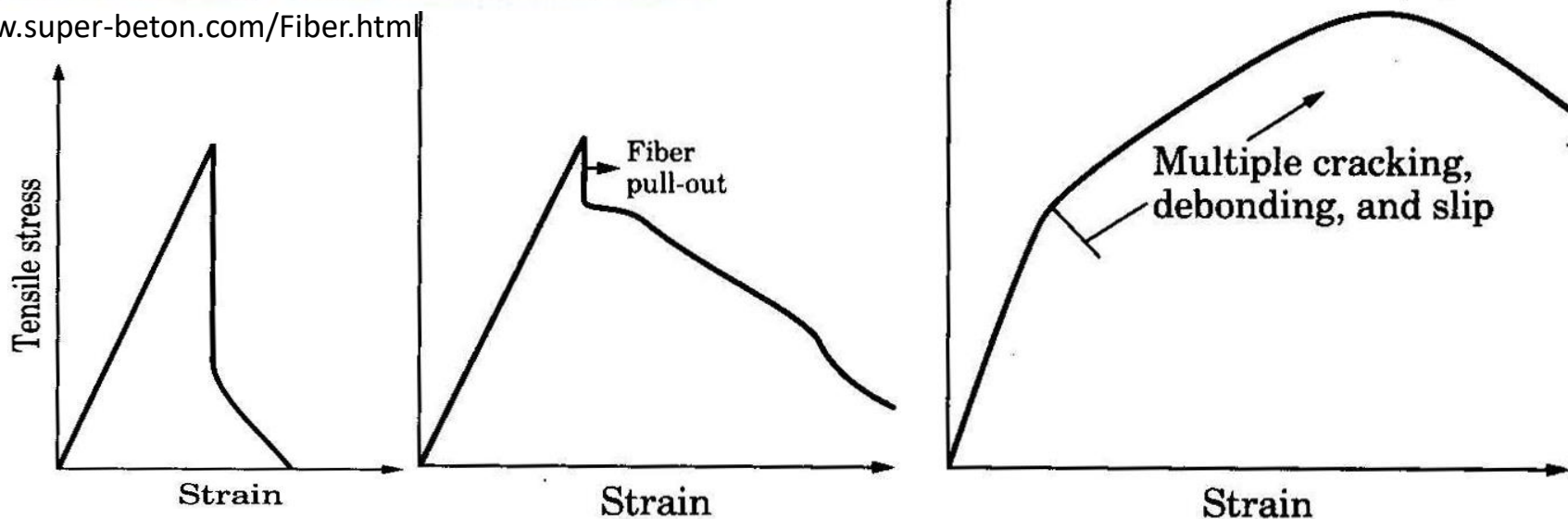
# CRF: Interação Fibra-Matrix

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

Aumento do teor de fibra



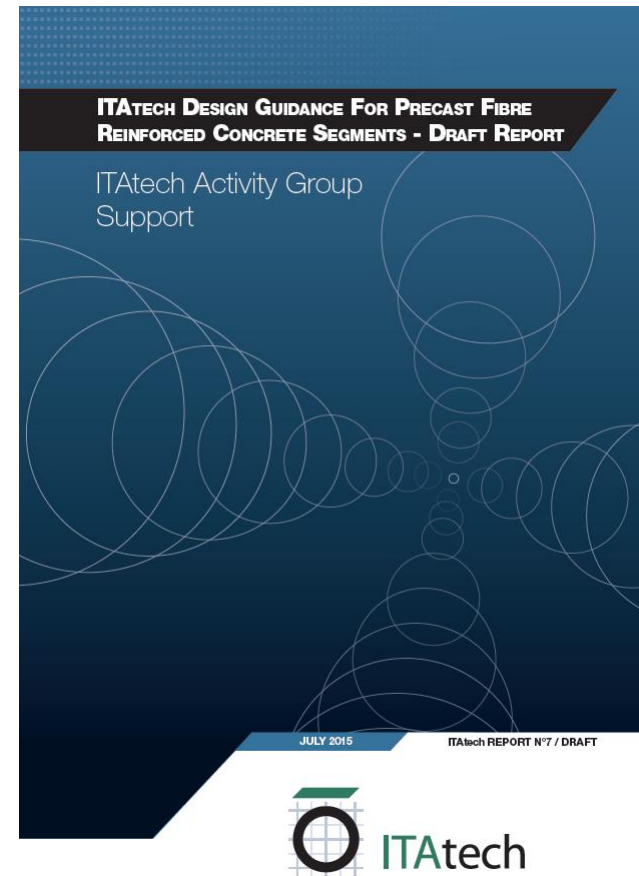
<http://www.super-beton.com/Fiber.html>



# Campos de aplicação das fibras de aço

## Estruturas contínuas

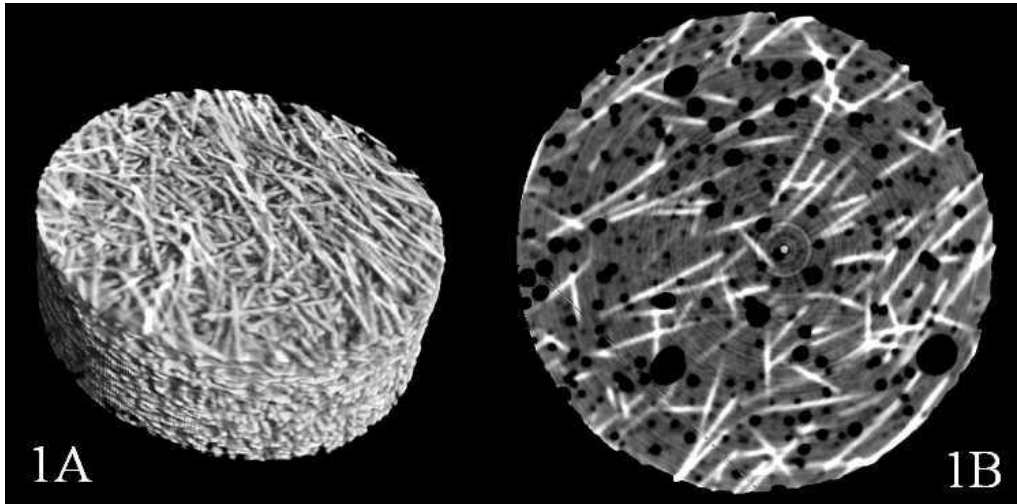
- Túneis (TBM e NATM)
- Pavimentos rodoviários e industriais
- Pistas de pouso
  - Redistribuição de esforços e substituição de tela
- Pré-moldados
- Edifícios



ITAttech Working group 2.  
Design guidance for  
precast fibre reinforced  
concrete segments  
(DRAFT)



# Campos de aplicação das fibras de aço



X-ray tomograph of RPC core. Figure 1A shows isometric view of 3-D reconstruction; 1B shows plan view of 2-D section (H. Saleh, WJE Asc., FHWA NDE Center).

Washer, G., Fuchs, P., Graybeal, B. Elastic properties of reactive powder concrete. International Symposium (NDT-CE 2003) Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003.

Estruturas  
sujeitas a  
impactos  
RPC

reactive powder  
concrete  
800 MPa  
micro-fibras



# Campos de aplicação das fibras de aço

## Pré-moldados



# Estruturas convencionais

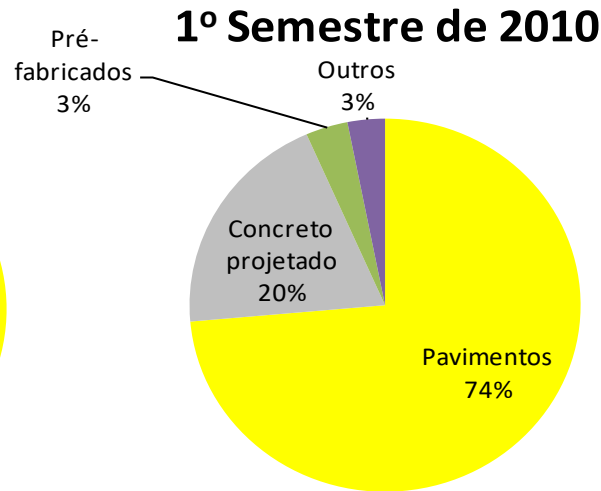
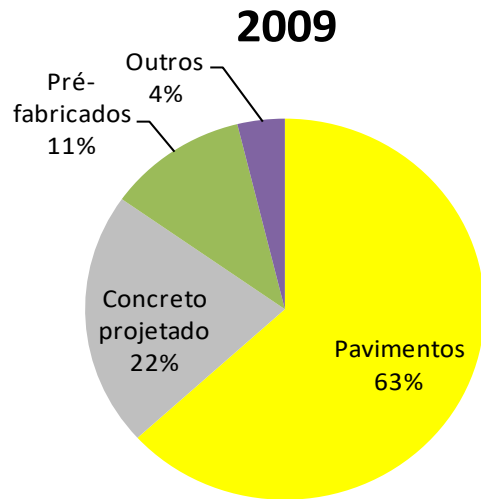
Aplicação do CRF em lajes suspensas  
como único sistema de reforço em edifício  
multipavimentos construído na Estônia  
(DESTRÉE, 2009)



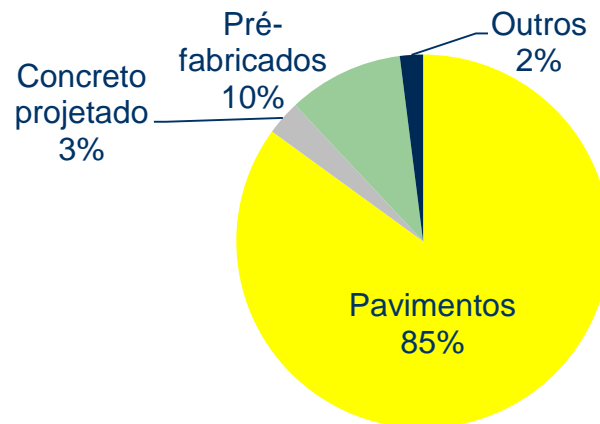
**Model Code 2010.  
Bulletins 55 y 56**



# Mercado brasileiro



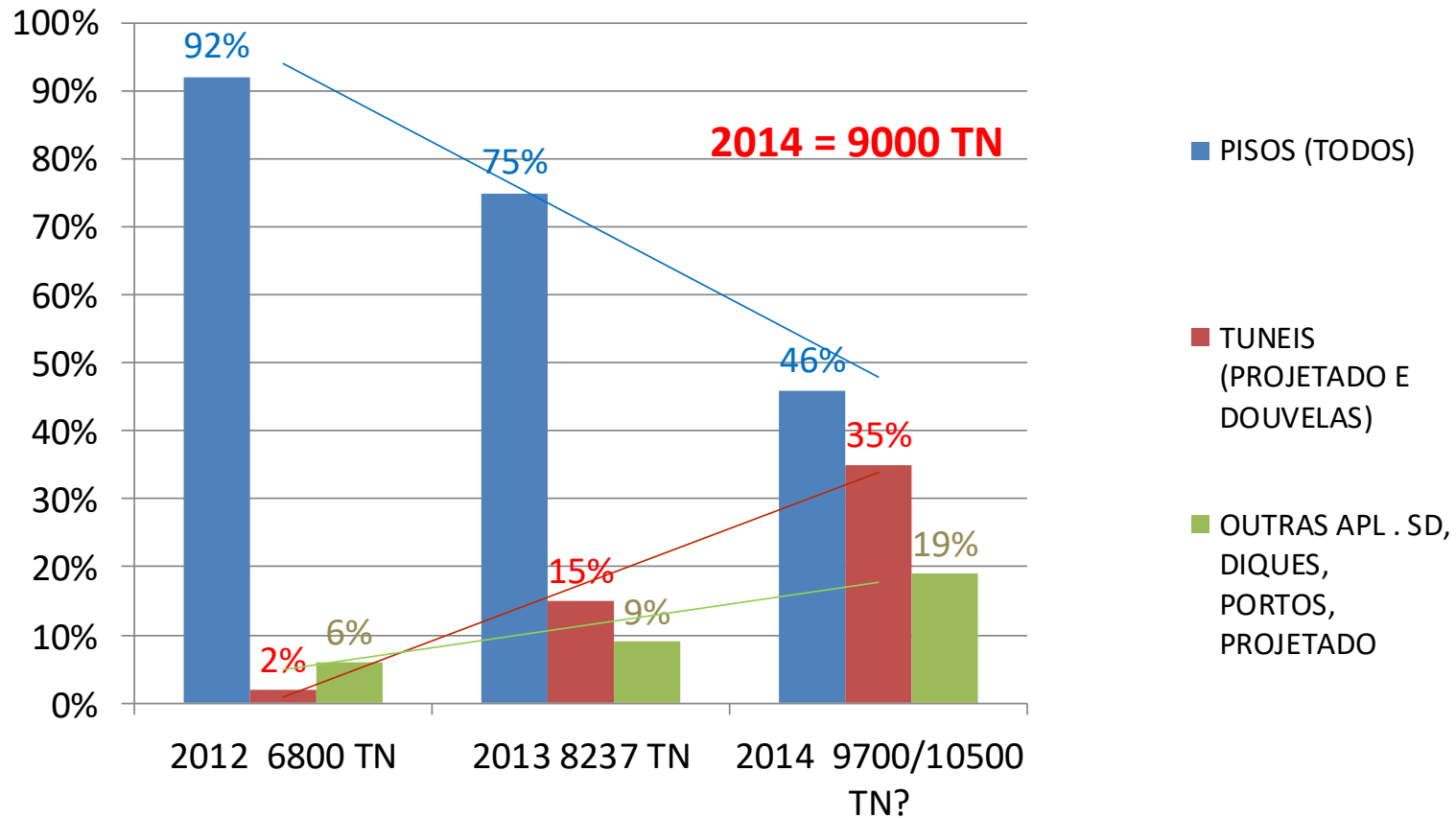
Aço



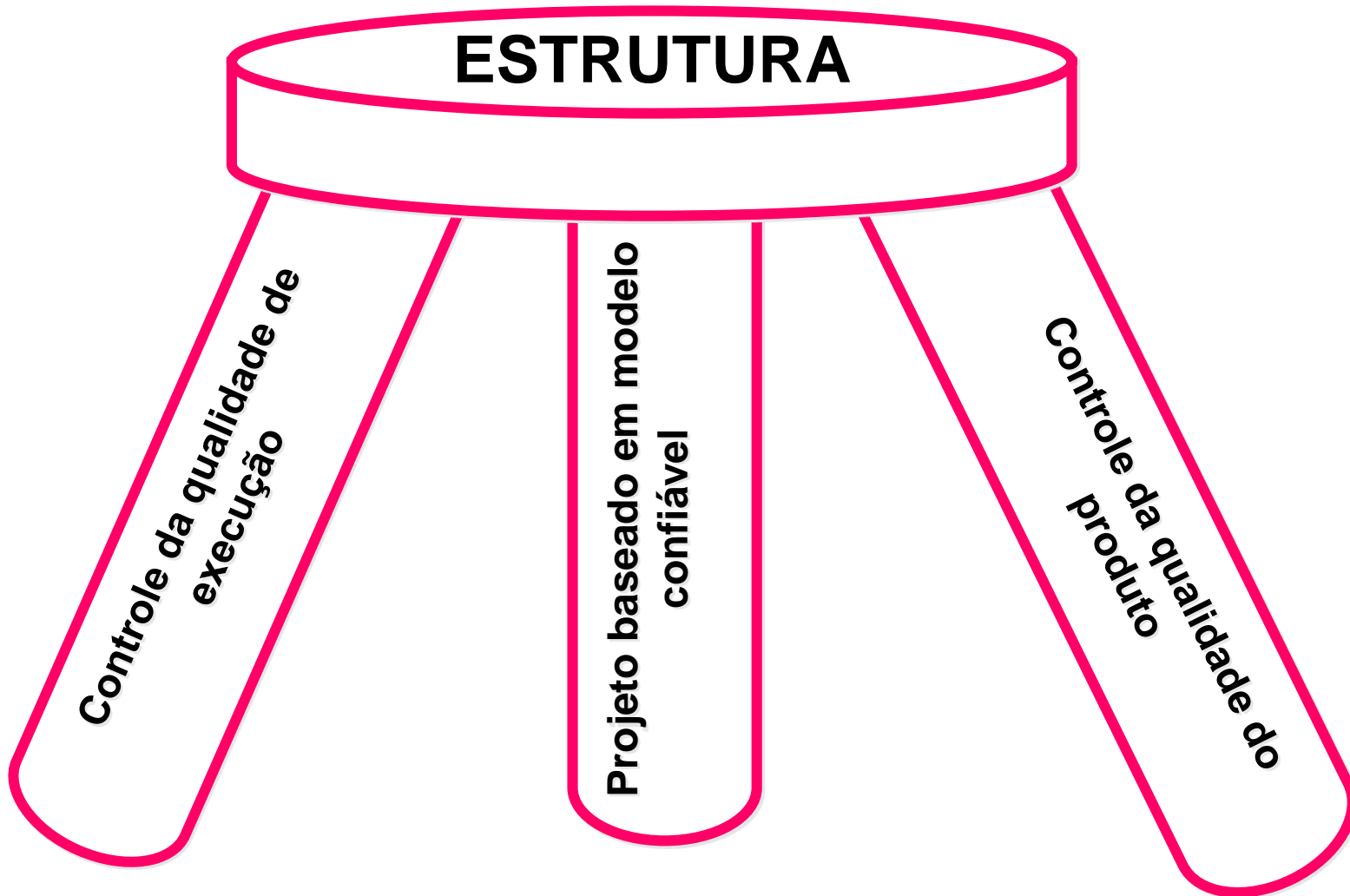
Polimérica

# 1- DRAMIX Sales Growing Tendency

2012-2014 All Applications - TN/YEAR/%



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



# O DESAFIO DO “PÉ” DO MODELO DE DIMENSIONAMENTO *fib Model Code*

Baseado no trabalho:

M. di Prisco, G. Plizzari, L. Vandewalle **FIBER REINFORCED CONCRETE  
IN THE NEW FIB MODEL CODE.** *3rd fib International Congress - 2010*

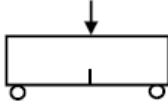
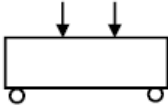



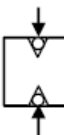
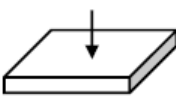
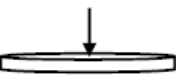
*fib Model Code*

# Desenvolvimento dos modelos de dimensionamento

- Existe um distanciamento entre o desenvolvimento tecnológico e o de modelagem estrutural do CRF:
  - Estudos com enfoque tecnológico já são realizados há mais de 50 anos.
  - Estudos com enfoque de modelagem estrutural ou resposta de componentes estruturais são feitos há menos de 25 anos.



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

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

# Nem tudo é vantagem

Fibras reduzem a fluidez

- São um bloqueio à movimentação dos agregados graúdos: perda de mobilidade da mistura.

Não há completa convicção do teor incorporado (concreto projetado) ou orientação das fibras (concreto lançado)



# Nem tudo é vantagem

## **Custo:**

Inviável em aplicações corriqueiras e com teores muito altos

Custo global favorável

estrutura como um todo

execução

custos de manutenção

Falta de normalização para controle

Resistência do usuário (problema cultural)

Diversidade de enfoques tecnológicos

Falta de cultura para dimensionamento

# Problemas recorrentes:

Revista Técnica | Reforço de fibra - Fibras evitam fissuração e aumentam a resistência à tração - Windows Internet Explorer

http://www.revistatechne.com.br//engenharia-civil/170/reforco-de-fibra-fibras-evitam-fissuracao-e-aur

Favoritos Revista Técnica | Reforço de fibra - Fibras evitam f...

NOTICIÁRIO REVISTAS TCPO LIVROS SOFTWARE EVENTOS PINI ENGENHARIA GUIA DA CONSTRUÇÃO PINI EMPREGOS LOJA PINI

Anuário PINI | Preços Pesquisados | Como Especificar | Índices e Custos | Atualização Monetária

Depois de todos esses anos investindo em tecnologia, ainda estamos em fase de crescimento.

PASSE O MOUSE

Votorantim Cimentos

Orça infra

PUBLICIDADE

busca login / senha

Buscar... OK

cadastre-se grátis esqueci a senha

Assine | Cadastro | Newsletter | Eds Anteriores | Anuncie

EDITORIAL SUMÁRIO ÁREA CONSTRUÍDA ÍNDICES IPT RESPONDE CARREIRA MELHORES PRÁTICAS ARTIGOS COMO CONSTRUIR ENTREVISTAS REPORTAGENS

**MATERIAIS** | + Compartilhe | f my

Materiais


» **Reforço de fibra**

Fibras evitam fissuração e aumentam a resistência à tração dos pisos e pavimentos de concreto. Veja como utilizar diferentes tipos

Por Luciana Tamaki

CAPA Força Solar

Anteriores



# Comentários finais

- Demandas tecnológicas a serem cobertas:
  - Falta de normalização
  - Falta de metodologia de avaliação consensual
  - Controle e modelagem da trabalhabilidade
  - Orientação da fibra X desempenho
  - Controle da trabalhabilidade/execução de elementos
  - Fibras alternativas (vidro, poliméricas, etc.)
- Durabilidade: avaliação e modelos
- Muitas opções de inovação técnica
  - FGM, novas aplicações, sistemas híbridos, componentes de revestimento, etc.

# A disciplina

- Dinâmica das aulas
- Trabalho prático
  - Priorizar a inclusão de parte experimental
  - Que temas?
- Avaliação