



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

Programa de Pós-Graduação

ENGENHARIA CIVIL

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

Comportamento básico dos compósitos

Antonio Figueiredo

Renata Monte

Luís Bitencourt

Objetivos da aula

- Entender o comportamento básico dos compósitos.
- Evitar as perguntas:
 - Vale a pena usar fibra?
 - A fibra funciona?
- Podemos utilizar CRF para aplicações estruturais?
- Podemos utilizar modelos de previsão de comportamento?



Interação Fibra X Matriz

- A interação entre a fibra e a matriz é o condicionante fundamental que define o comportamento do compósito.
- É necessário entender essa interação para parametrizar a contribuição das fibras e para prever o comportamento do compósito.
- Muitos são os fatores envolvidos: objeto de diversas pesquisas científicas.

Interação Fibra X Matriz

- Os principais parâmetros que podem ser elencados:
 - Composição/propriedades da matriz:
 - Distribuição, forma e teor dos agregados;
 - Resistência e rigidez da matriz;
 - Condição de fissuração matriz: fissurada ou não.
 - Propriedades da fibra:
 - Geometria da fibra;
 - Natureza da fibra;
 - Característica superficial da fibra;
 - Rigidez da fibra em comparação à da matriz;
 - Orientação das fibras no compósito;
 - Volume de fibras;
 - Durabilidade da fibra no compósito.
 - Tipo e forma de aplicação do esforço:
 - Tipo de esforço (tração, compressão, cisalhamento, dinâmico, estático, etc.)
 - Taxa de carregamento;

Interação Fibra X Matriz

Considerando a quantidade de parâmetros e ainda a interação existente entre eles, entende-se porque a previsão de comportamento e a modelagem do comportamento do compósito cimentício com fibras é tão mais complexa que a do concreto armado.

Modelo de Aveston-Cooper-Kelly (ACK)

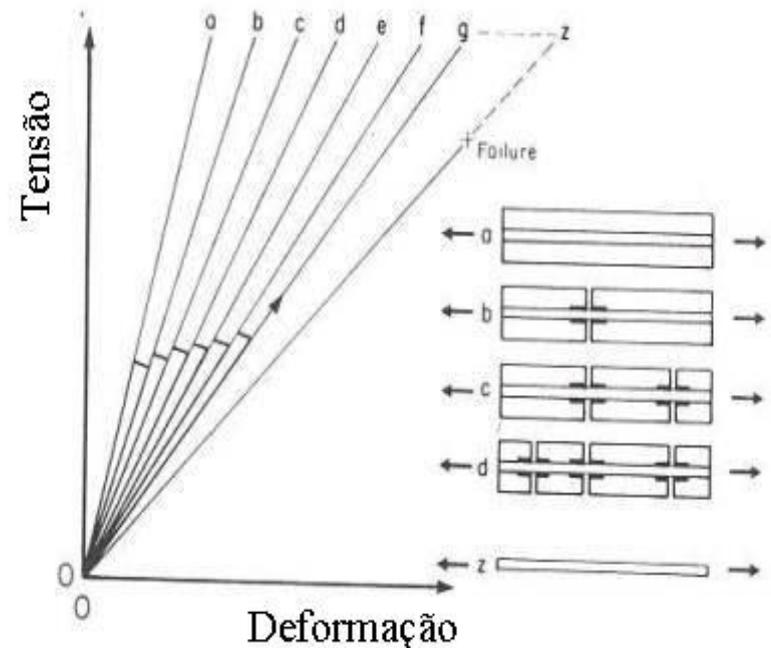
- Modelo considera matriz homogênea e fibras contínuas alinhadas na direção principal de tensão



$$E_C = E_m \times V_m + E_f \times V_f$$

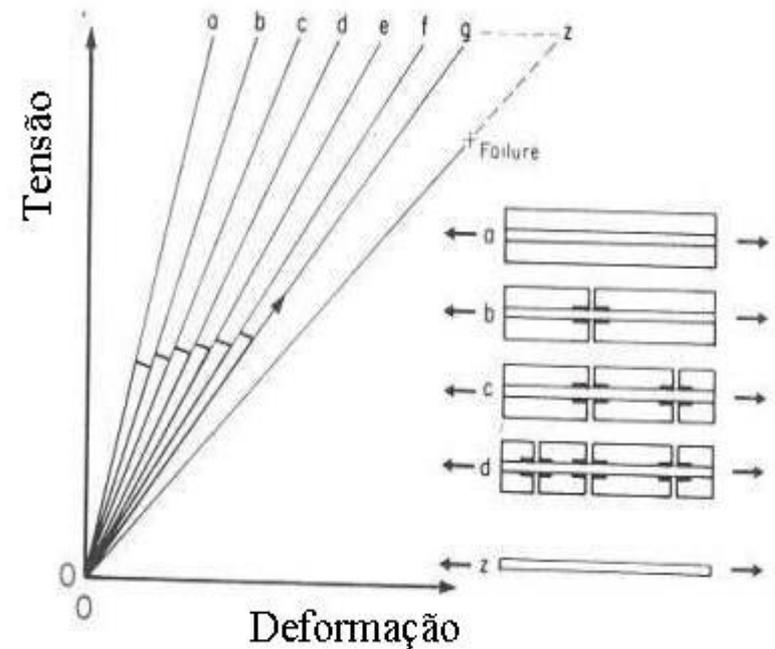
Modelo de Aveston-Cooper-Kelly (ACK)

- A teoria de ACK considera três estágios na curva tensão-deformação:
 - No primeiro estágio o material se comporta como elástico-linear. A rigidez do compósito (E_{c1}) pode ser derivada da lei das misturas. É considerada uma aderência perfeita entre a matriz e as fibras.



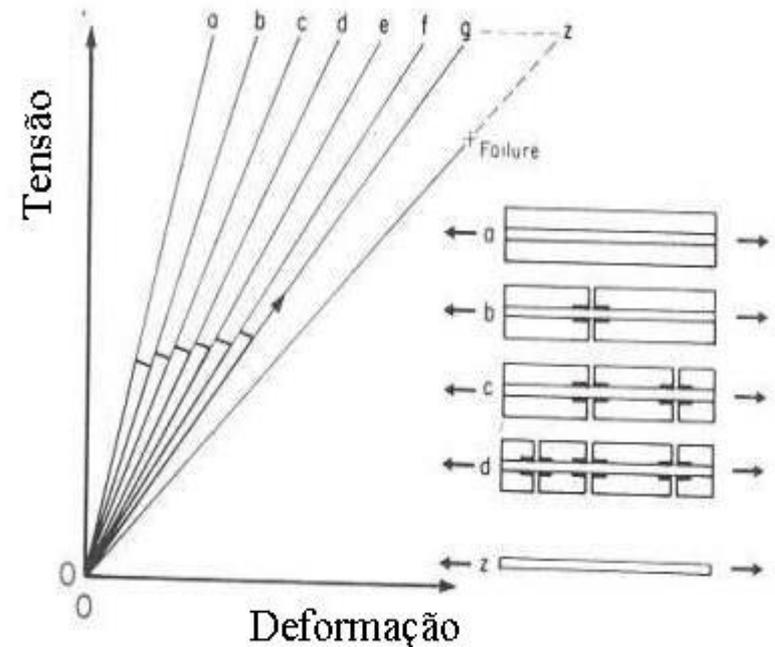
Modelo de Aveston-Cooper-Kelly (ACK)

- A teoria de ACK considera três estágios na curva tensão-deformação:
 - Atendida a deformação última da matriz o compósito irá fissurar. Se o volume de fibras for superior ao volume crítico, as fibras serão capazes de sustentar cargas adicionais (estágio de múltipla fissuração).
 - No terceiro estágio a matriz está completamente fissurada e as fibras suportarão as cargas.



Modelo de Aveston-Cooper-Kelly (ACK)

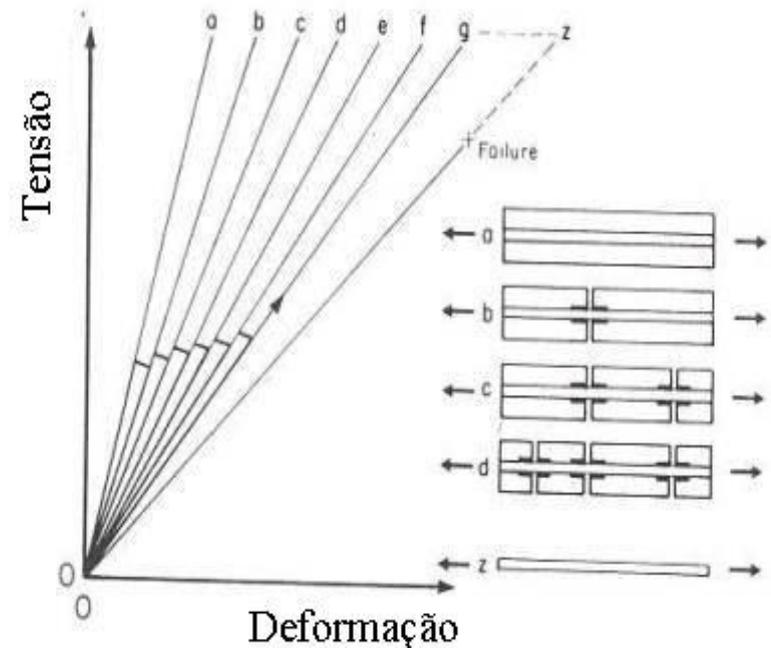
- Adota o conceito de múltipla fissuração
- Modelo melhorado para levar em conta a curva tensão/deformação do compósito
- Pode haver aumento da capacidade resistente após múltipla-fissuração



Fundamentos dos materiais reforçados com fibras (ACK)

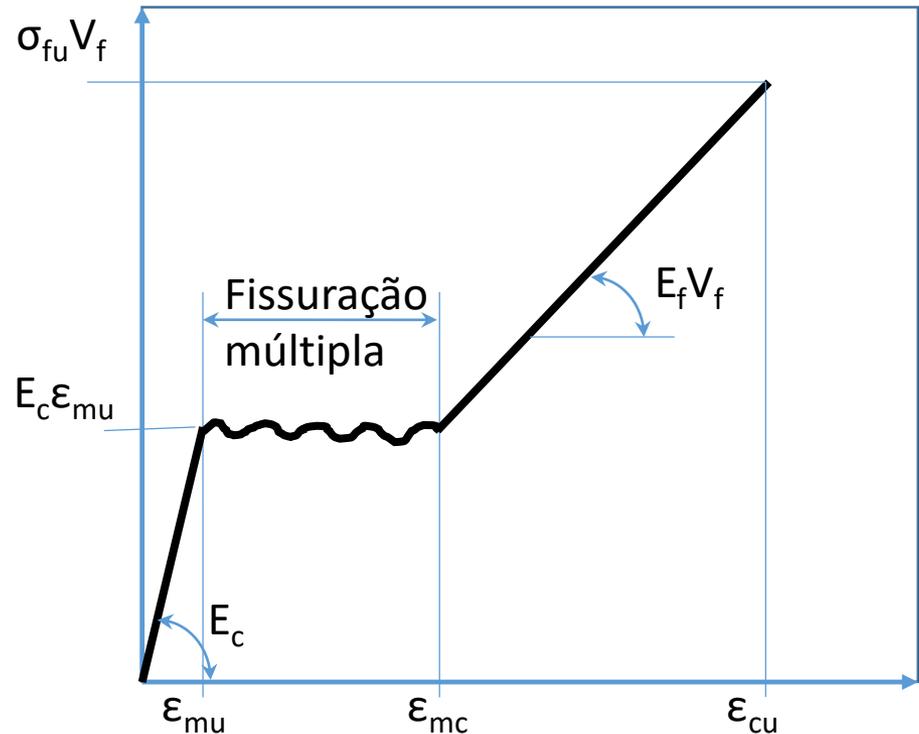
- Fibras atuam como:
 - Reforço de matrizes frágeis e dúcteis
 - Ponte de transferência de tensão nas fissuras formadas em matrizes frágeis

⇒ múltipla fissuração:
material quasi-dúctil
(pseudo-dúctil) ou não frágil



Modelo de Aveston-Cooper-Kelly (ACK)

- Ganho de resistência pós-fissuração ocorre pelo alongamento e mobilização das fibras
- A ruptura do compósito ocorre quando as fibras atingem o seu limite último de deformação/tensão
- Vantagem do modelo: representar, de maneira simples, o comportamento do material



$$E_C = E_m \times V_m + E_f \times V_f$$

Modelo de Aveston-Cooper-Kelly (ACK): Volume crítico

- A capacidade resistente do compósito pós-fissuração pode ser calculada de modo simplificado pela equação:

$$\sigma_c = \frac{4 \times V_f}{\pi \times d^2} \times \frac{1}{2} \pi d l \tau = 2 \times V_f \times \frac{l}{d} \times \tau$$

Nº de fibras/
unidade
de área

Resistência ao
arrancamento
de cada fibra

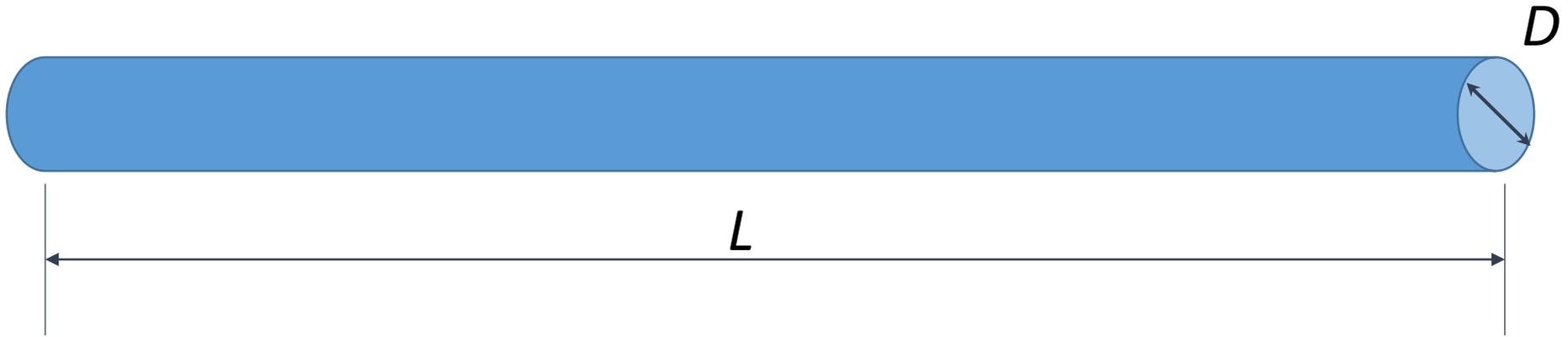
- Para que as fibras aumentem σ_c , temos que superar a condição crítica:

$$\sigma_c = 2 \times V_f \times \frac{l}{d} \times \tau = \sigma_m \quad \text{Condição crítica}$$

$$V_{f \text{ crítico}} = \frac{\sigma_m \times d}{\tau \times l \times 2} = \frac{\sigma_m}{\tau \times FF \times 2} \rightarrow \boxed{1-3\%}$$

$$\sigma_c = \sigma_m$$

O fator de forma das fibras (FF)

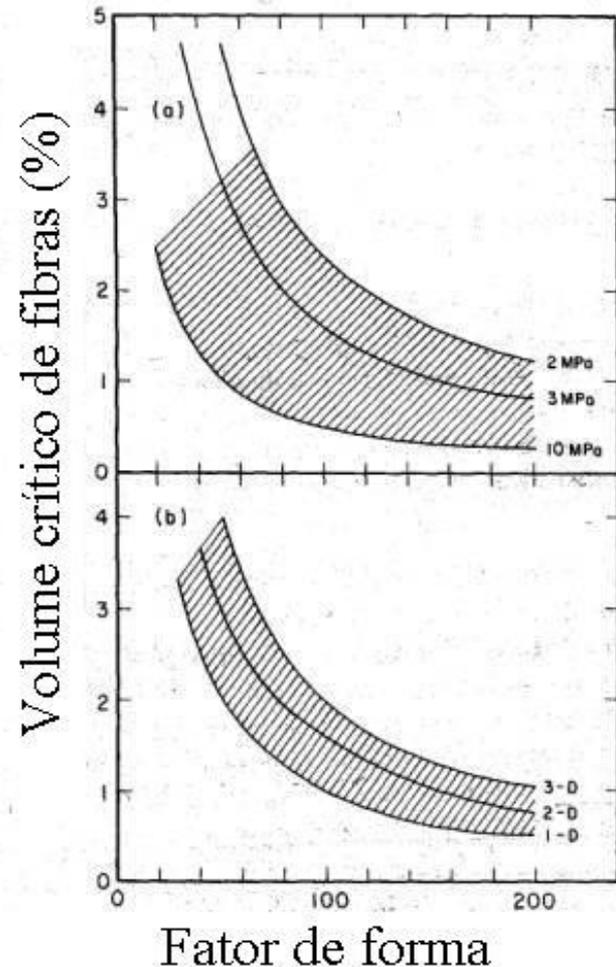


$$FF = \frac{L}{D}$$

Modelo de Aveston-Cooper-Kelly (ACK): Volume crítico

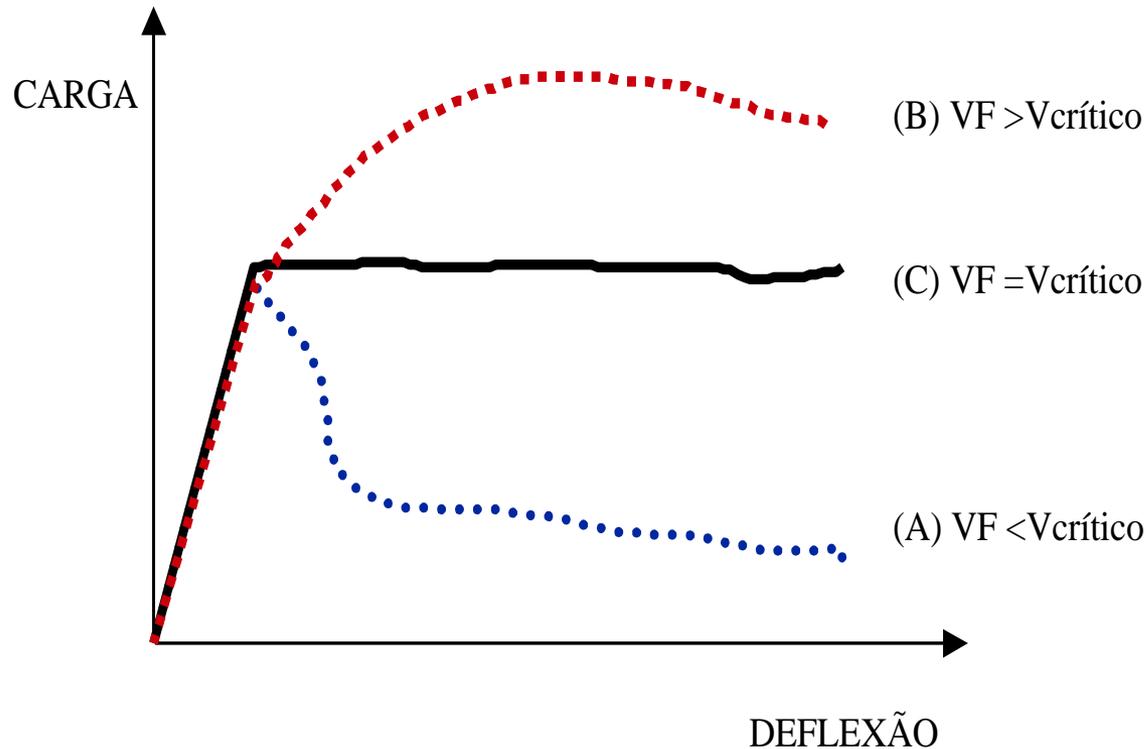
- O volume crítico de fibras depende das características da matriz (resistência) e das fibras como o fator de forma e o direcionamento da fibra.

$$V_{f_{critico}} = \frac{\sigma_m \times d}{\tau \times l \times 2} = \frac{\sigma_m}{\tau \times FF \times 2}$$



Softening and hardening

Endurecimento e abrandamento



$$V_{fcritico} = \frac{(\varepsilon_{mu} \times E_c)}{\sigma_{fu}}$$

V_{fcrit} = volume crítico de fibras dado em % do volume total

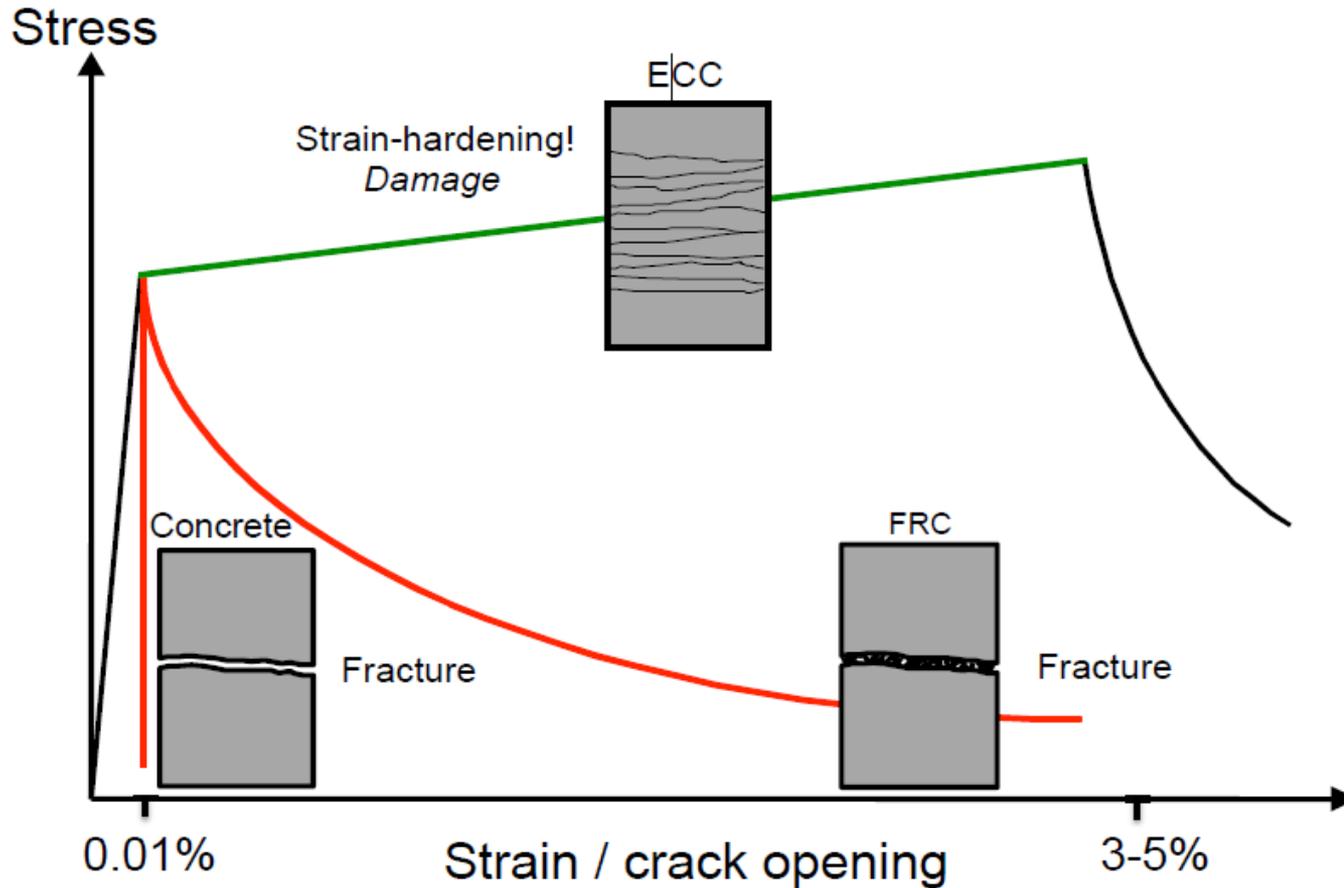
ε_{mu} = deformação última da matriz

σ_{fu} = tensão última das fibras

E_m = módulo de elasticidade da matriz

Softening and hardening

Endurecimento e abrandamento

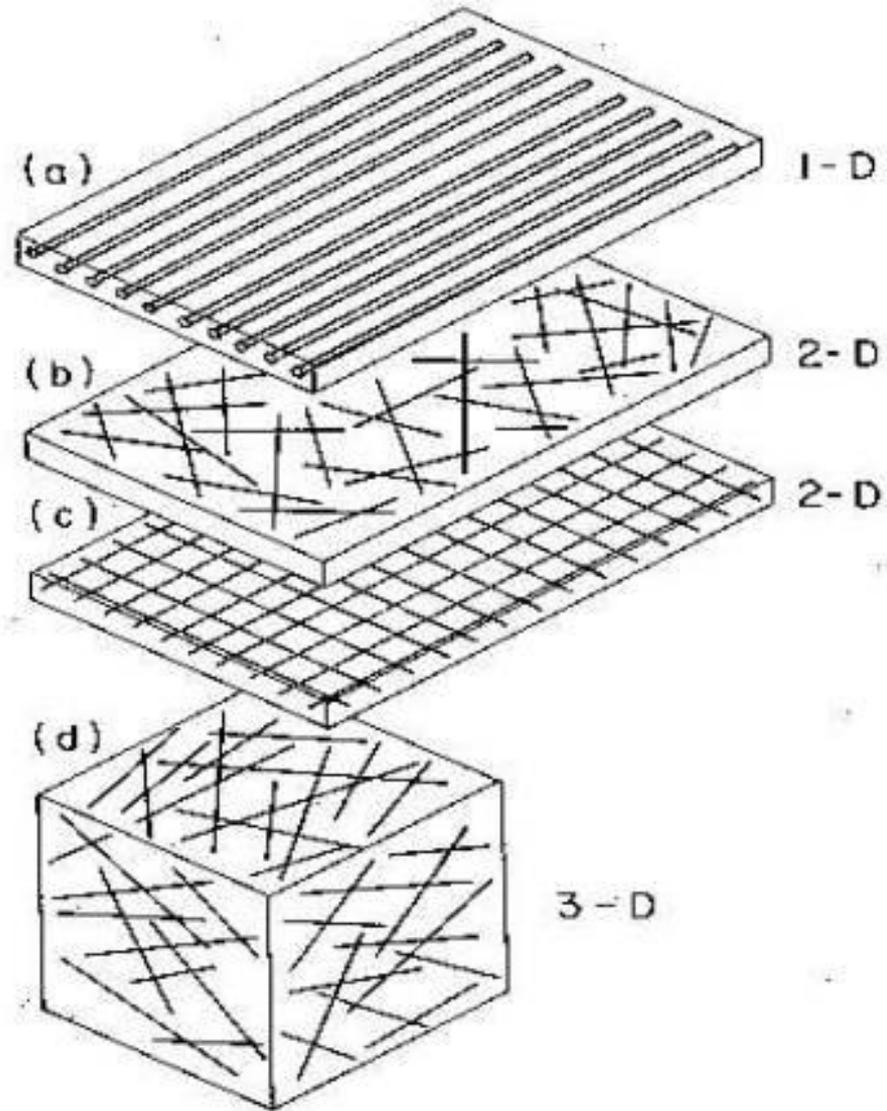


Disposição das fibras:

- (a) monodimensional;
- (b,c) bidimensional;
- (d) tridimensional;

Arranjo

- (a, c) Contínuo;
- (b, d) Descontínuo;



Orientação da fibra	Fator de eficiência para orientação	
	Não confinado	Confinado
1D	1	1
2D	1/3	3/8
3D	1/6	1/5

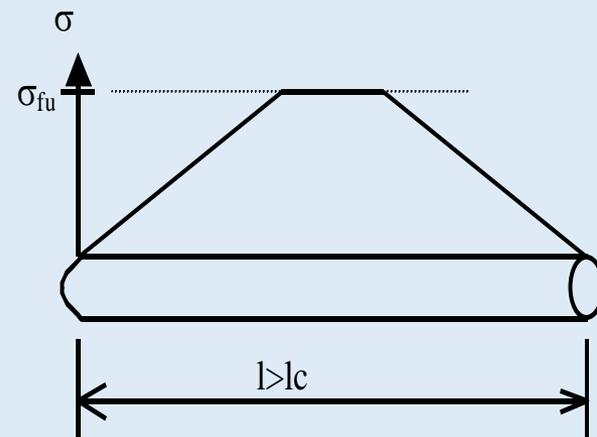
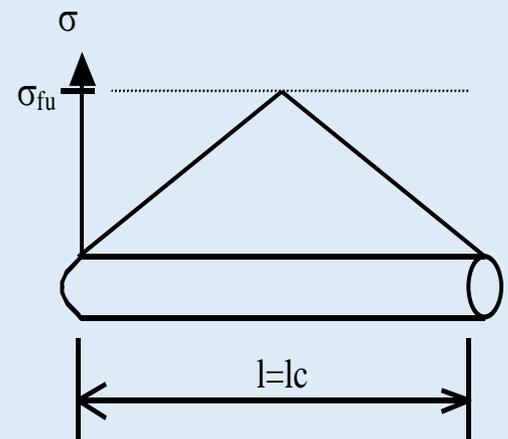
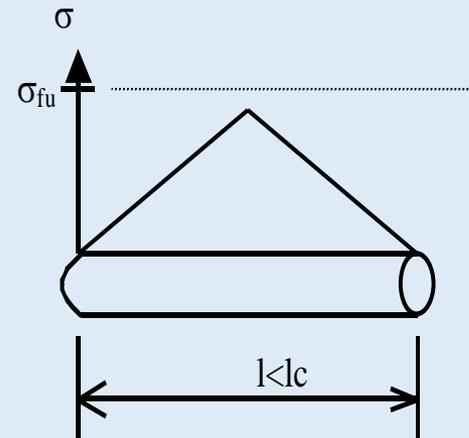
Fatores de eficiência

- Como as fibras não são contínuas deve-se utilizar um fator de eficiência para o seu comprimento:

$$n_1 = 1 - \frac{l_c}{2l}$$

- Como as fibras não são alinhadas deve-se utilizar um fator de eficiência para a sua orientação:

Orientação da fibra	Fator de eficiência para orientação η_2	
	Não confinado	Confinado
1D	1	1
2D	1/3	3/8
3D	1/6	1/5



Espaçamento entre as fibras (S)

S = Espaçamento entre as fibras;

K = Constante (0,8 a 1,2);

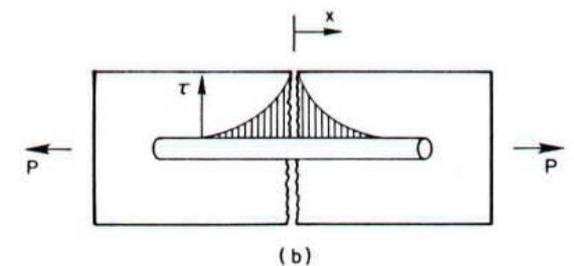
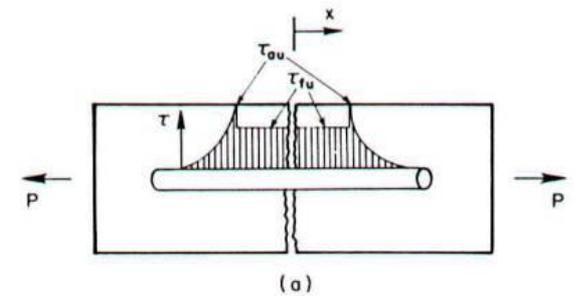
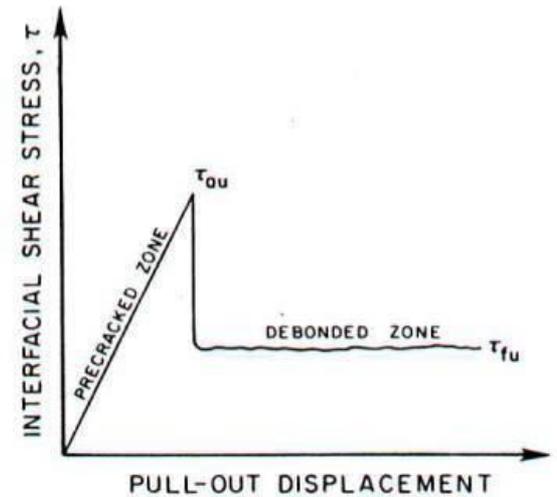
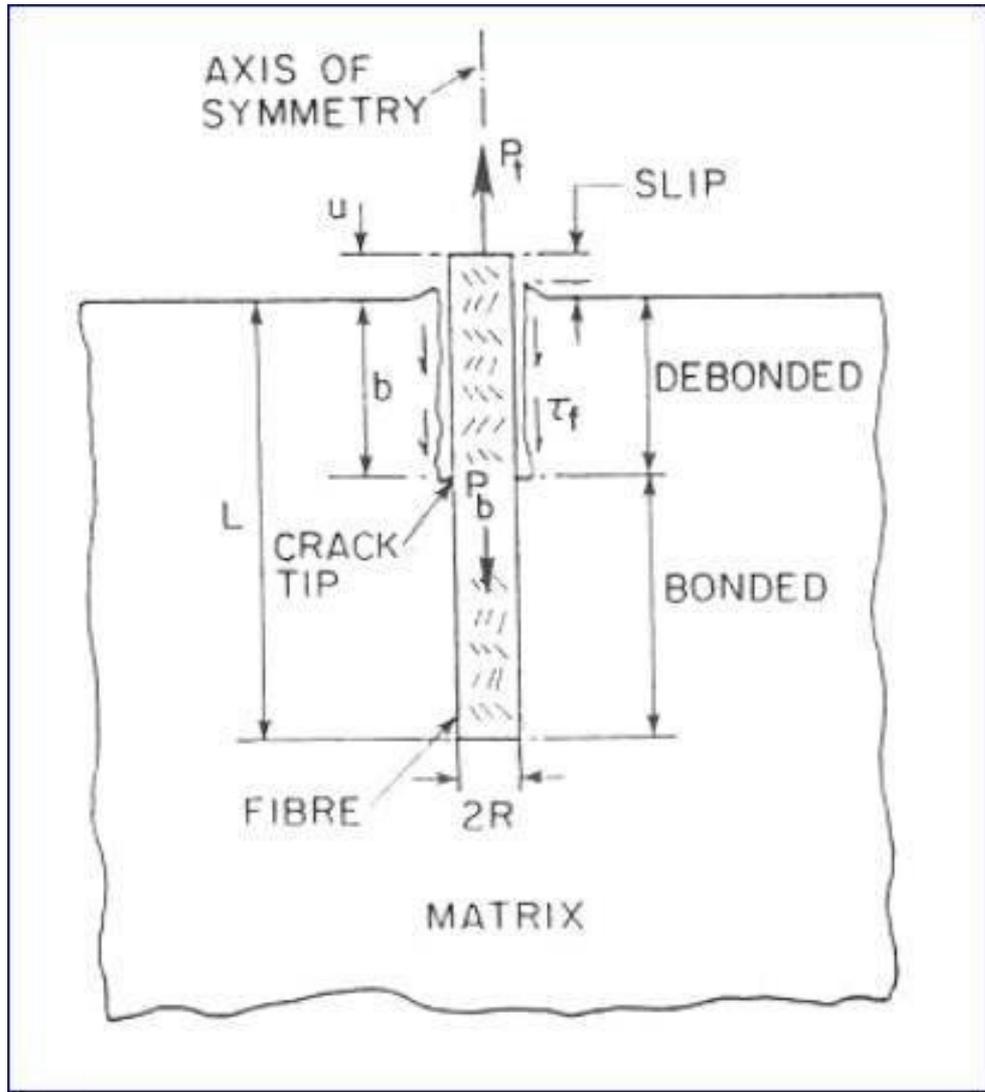
V_f = Consumo de fibras;

d = Diâmetro das fibras;

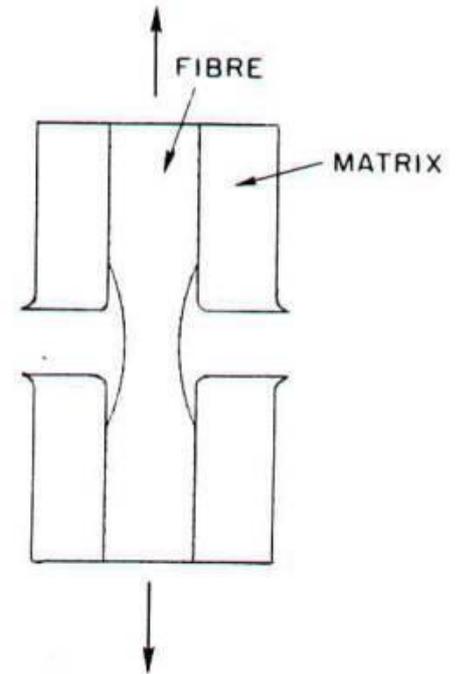
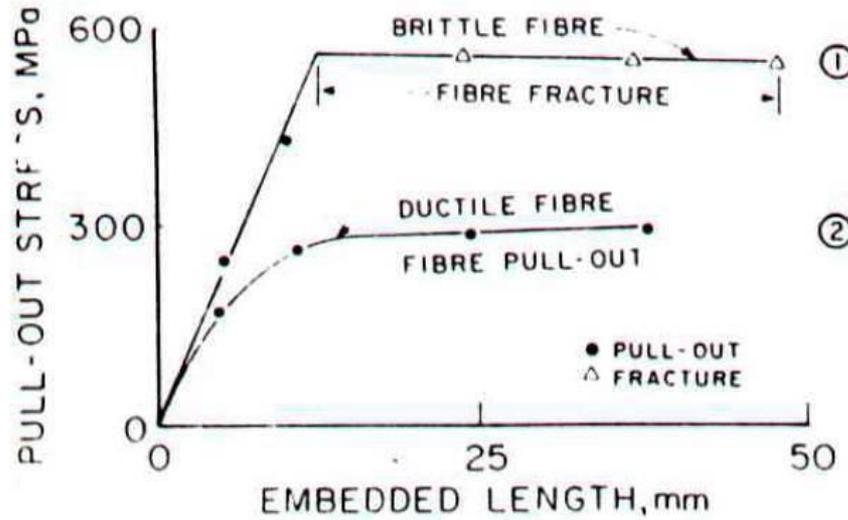
$$S = \frac{K \times d}{(V_f)^{1/2}}$$

- Fundamental no controle de indução de fissuras (FADIGA).
 - Distribuição volumétrica;
 - Processos de mistura.

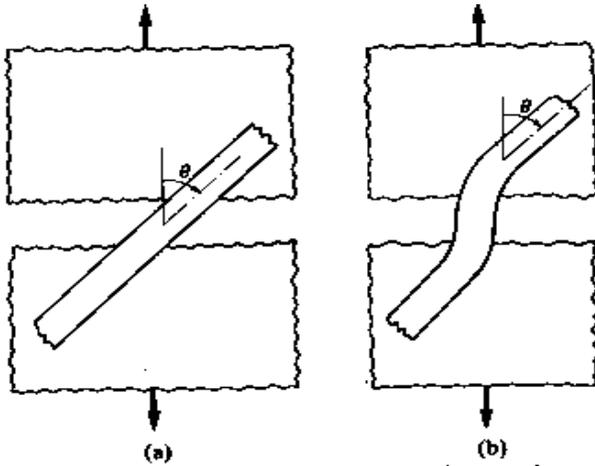
Carga X Deslocamento no arrancamento da fibra



- fibra frágil
- fibra dúctil

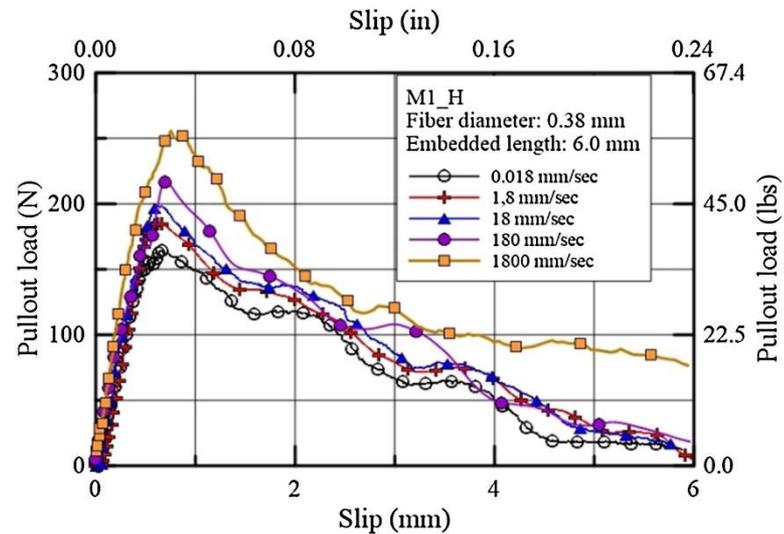
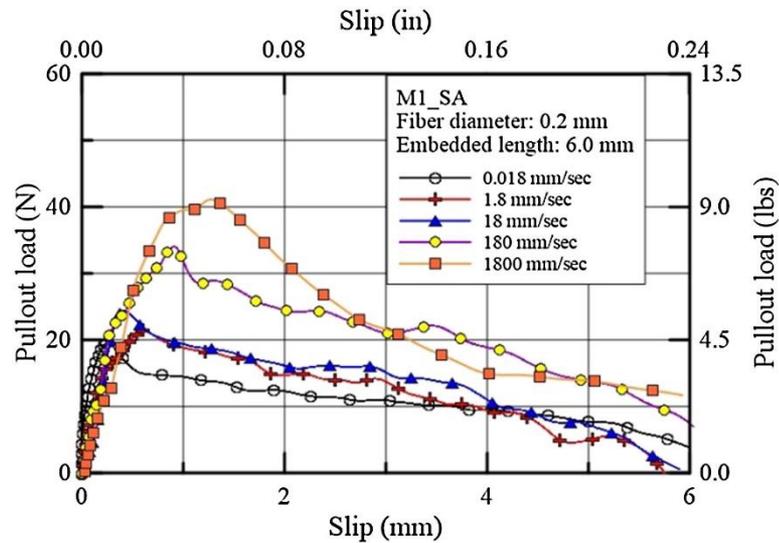


Inclinação em relação à fissura



A. Bhutta, M. Farooq, P. H.R. Borges, N. Banthia,
 Cement and Concrete Research
 Volume 107, May 2018, Pages 236-246

Influência do gancho no pullout



Tipo de fibra	Diâmetro [mm]	Comprimento [mm]	FF	Resistência à tração [Mpa]
Straight smooth (SA)	0.2	25.0	125	2860 (414.8)
Hooked (H)	0.38	30.0	79	2900 (420.6)

INTERFACE FIBRA/MATRIZ

Governa a interação fibra/matriz;

Zona de transição;

Microestrutura diferente;

Tipo de fibra;

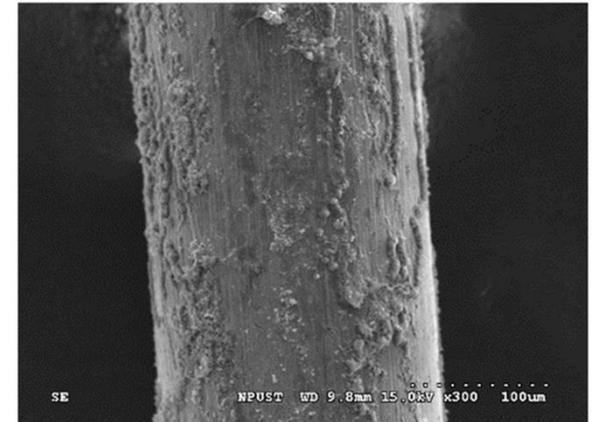
Tecnologia de produção;

Aderência fibra-matriz;

Formação de compostos CSH e CH

Atração de água ao redor da fibra;

Envolvimento deficiente entre 20 e 40 μ m;



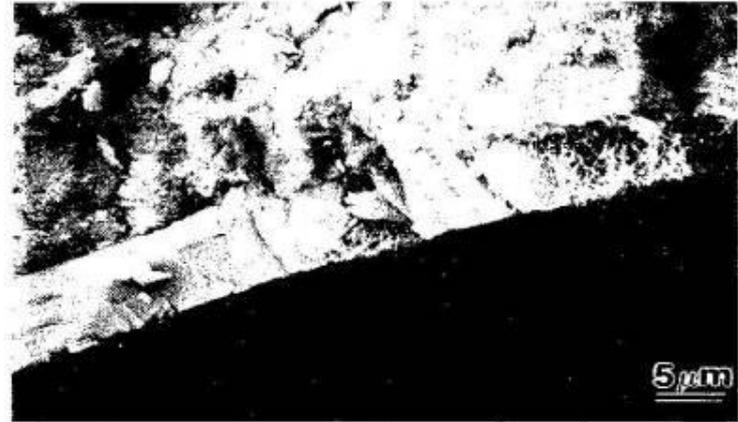
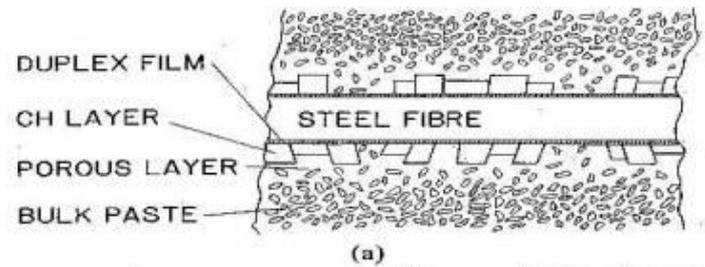
(b) SEM image of cementitious materials particle adhering to the fiber surface

Matrizes de consistência plástica

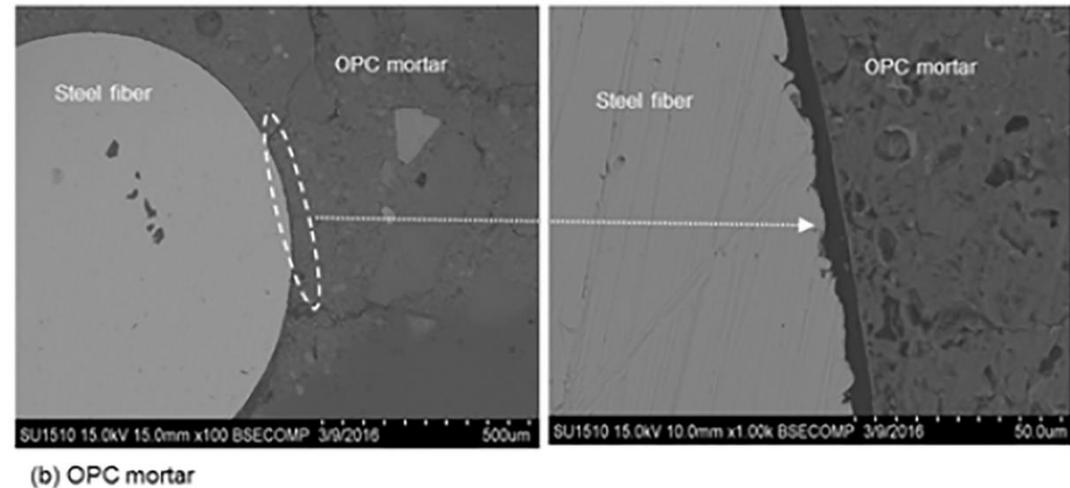
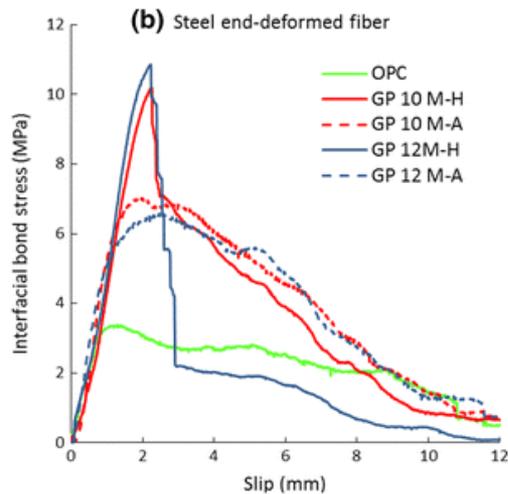
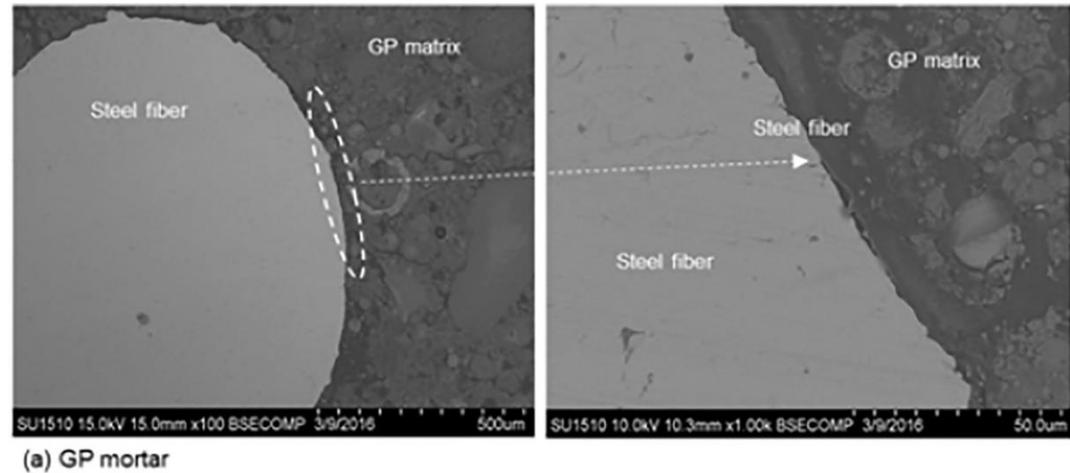
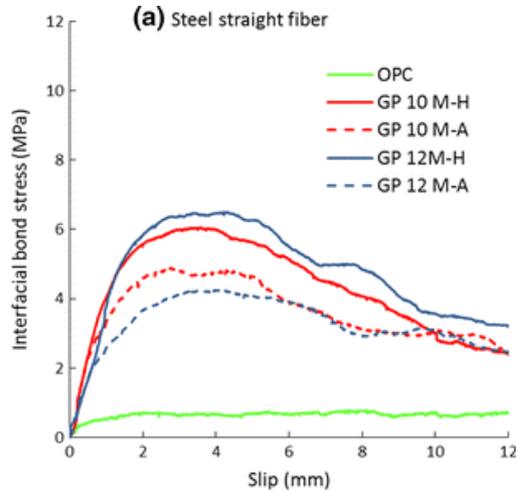
Matriz: pasta de **cimento**;

Zona de transição rica em CH;

Poros = CSH + etringita sobre uma camada de CH;



Aumento na aderência fibra-matriz com a melhora na zona de transição



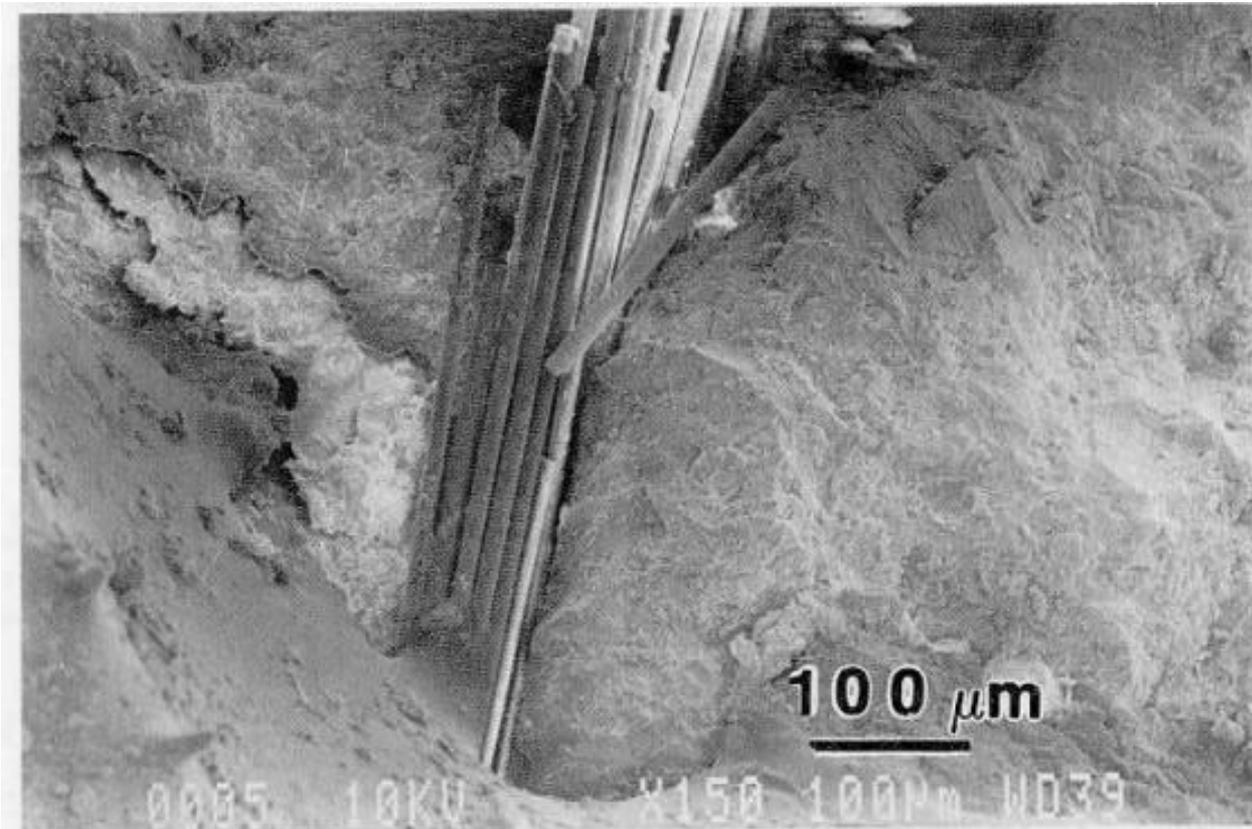
GP – argamassa com cinza volante ativada com NaOH (concentração 10 e 12M), mantidas em cura térmica (H) ou ambiente (A)

OPC – argamassa de cimento Portland

Fibras Multifilamentosas

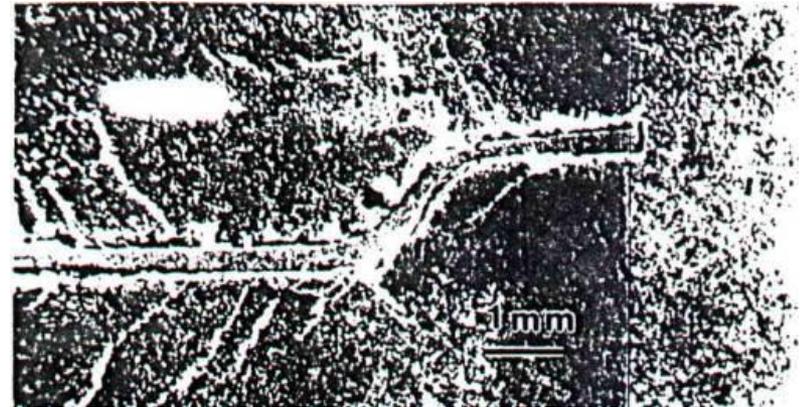
Filamentos agrupados;
Não se dispersam;

Contato com a matriz;
Penetração nos interstícios;
Afinidade com a pasta;
Preenchimento gradual
(nucleação).



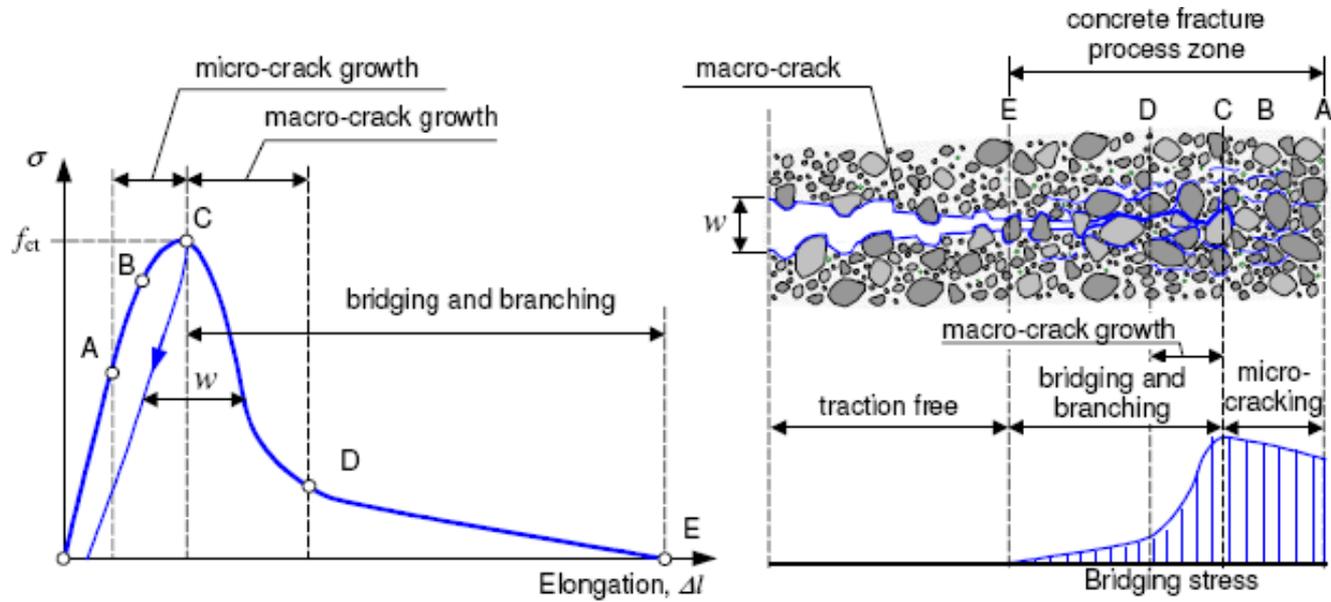
- Funções da fibra em matriz frágil:
 - conter iniciação e propagação de fissuras
 - ligar as fissuras, evitando colapso catastrófico.

- Interação fissura-fibra:
 - desvio
 - ramificação
 - desligamento fora da interface

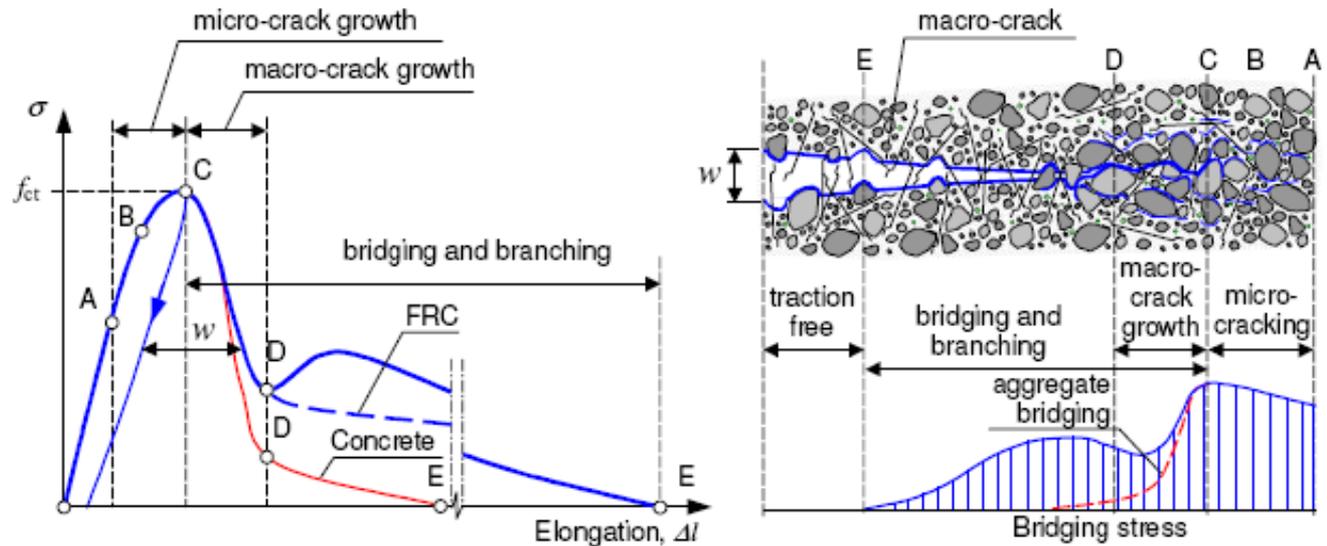


A matriz pode demandar diferentes níveis de energia de fratura: isto influencia a interação fibra-fissura

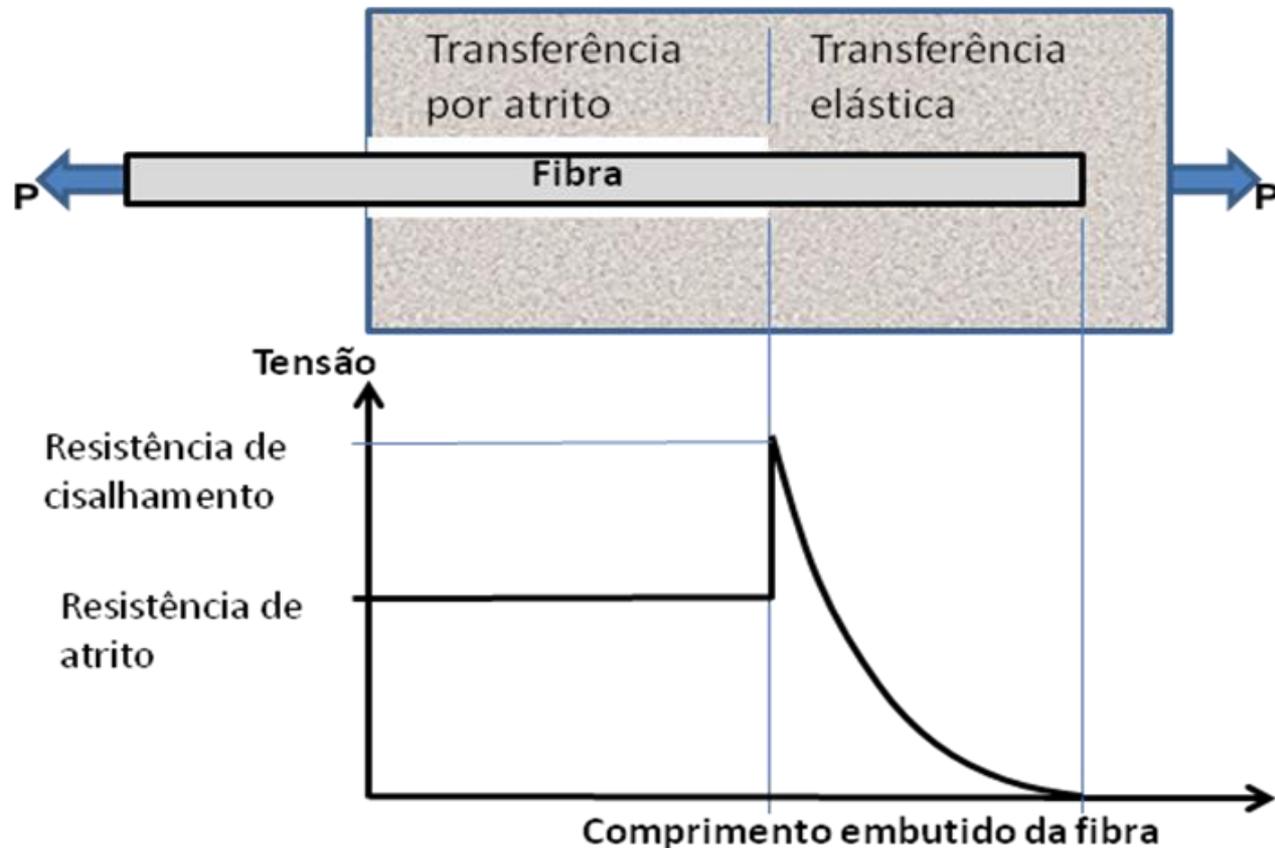
CONCRETO
SIMPLES



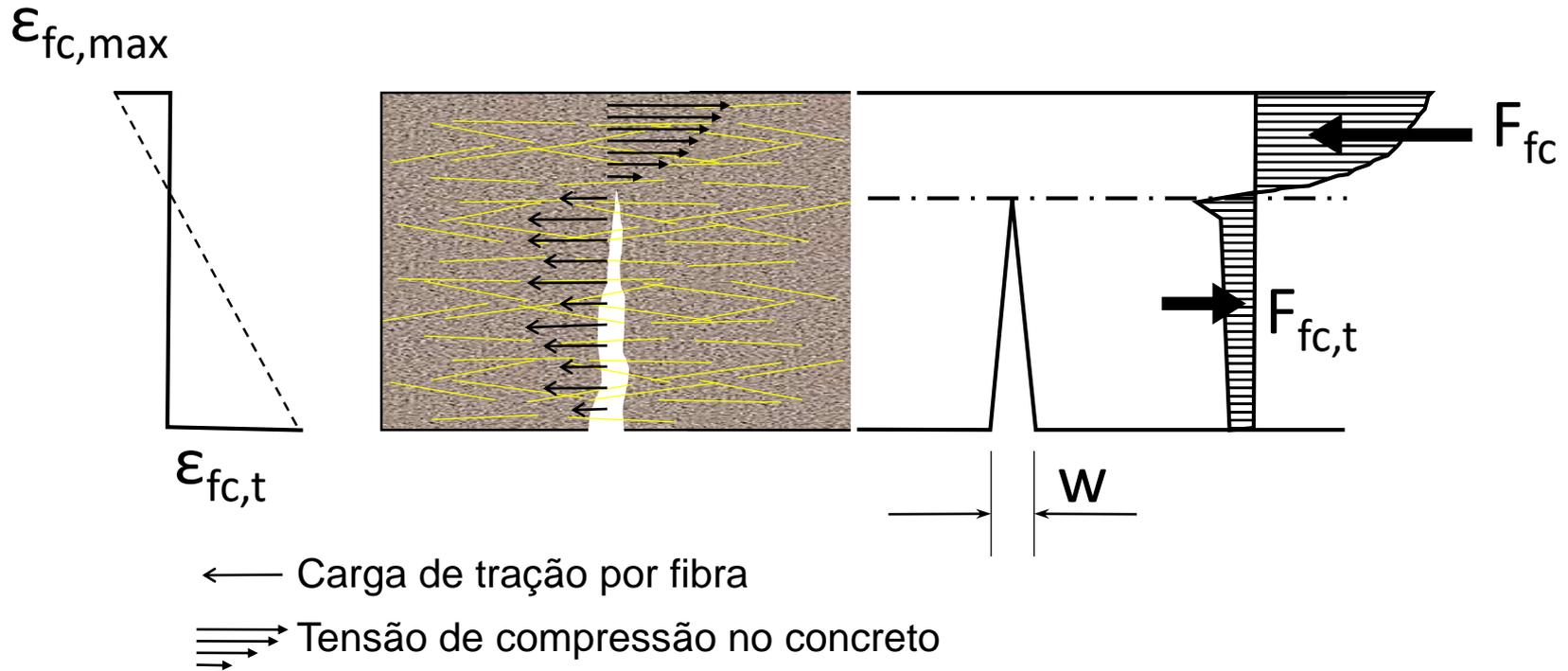
CONCRETO
COM
FIBRAS



A interação Fibra X Matriz

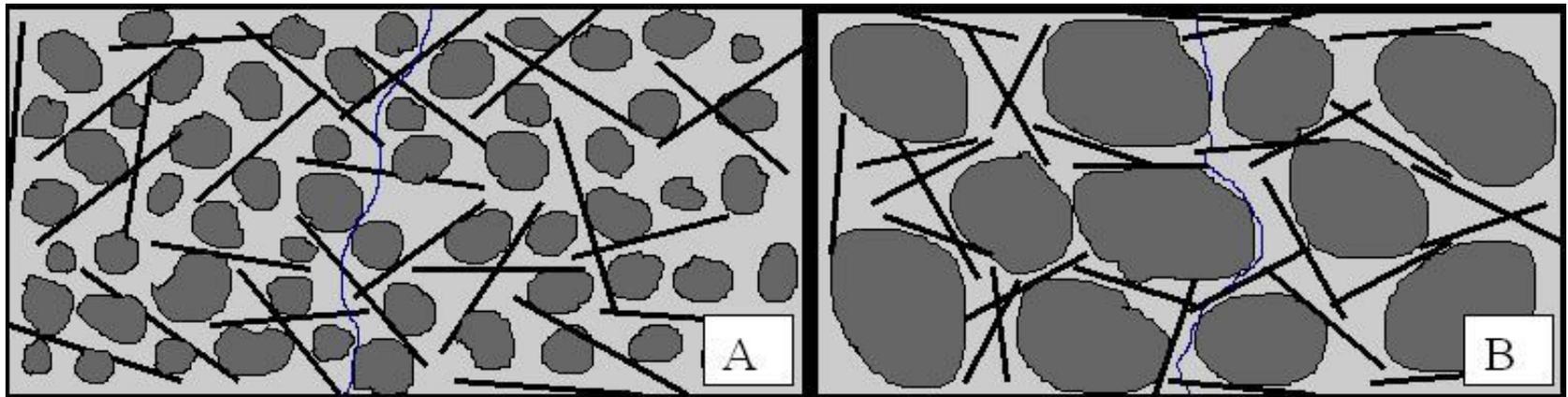


A interação Fibra X Matriz



A orientação em função dos agregados

- Agregados maiores favorecem a inclinações maiores das fibras e menor eficiência de reforço.

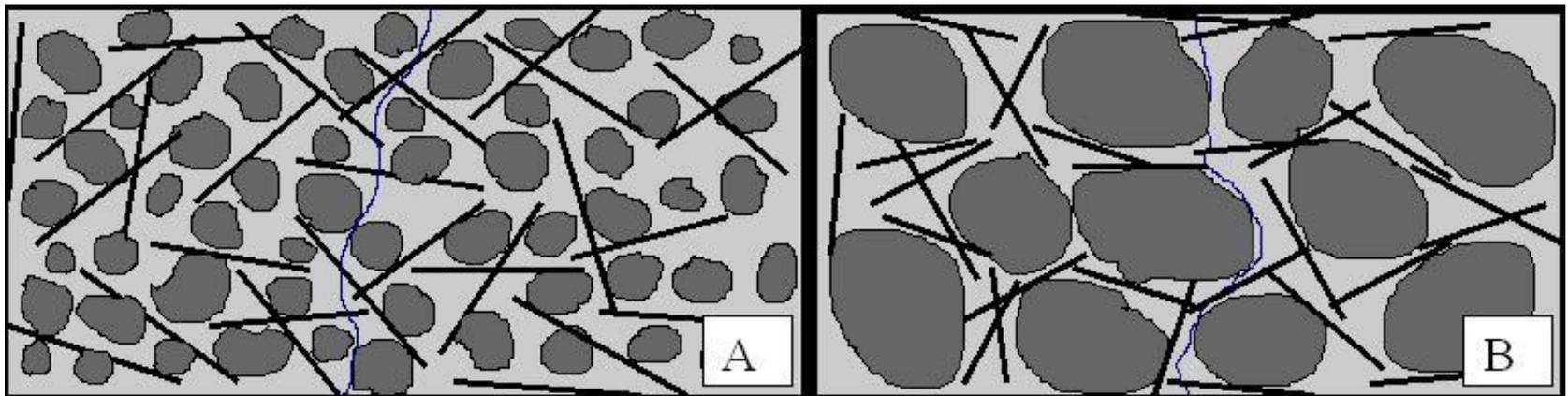


Compósito A: compatibilidade dimensional entre fibra e matriz

Compósito B: incompatibilidade dimensional entre fibra e matriz

Nem tudo é vantagem! Trabalhabilidade é um problema...

- Fibras tiram mobilidade da mistura
- Elas geram uma dificuldade para a movimentação relativa dos agregados graúdos principalmente.

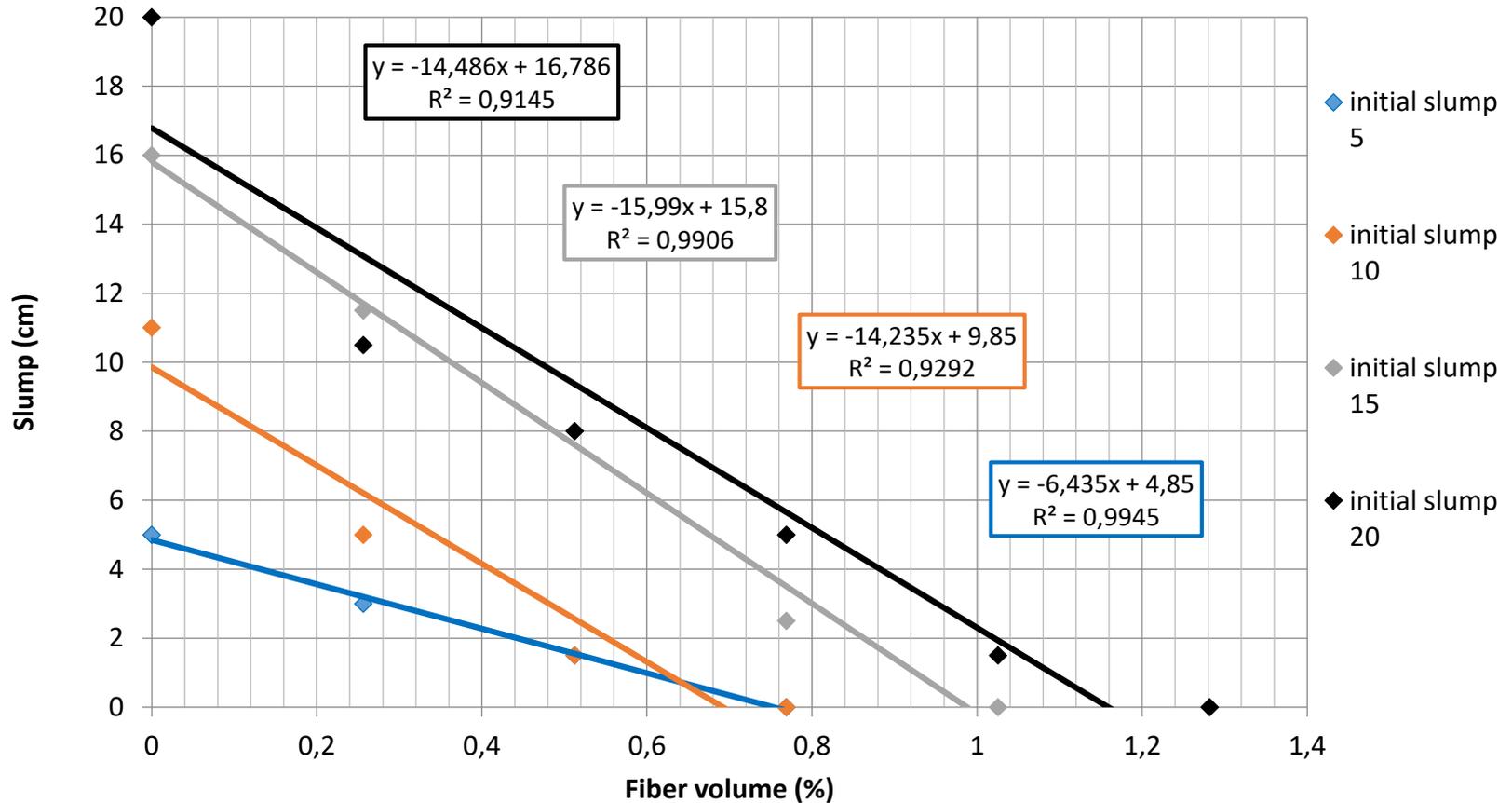


CRF: avaliação específica da trabalhabilidade

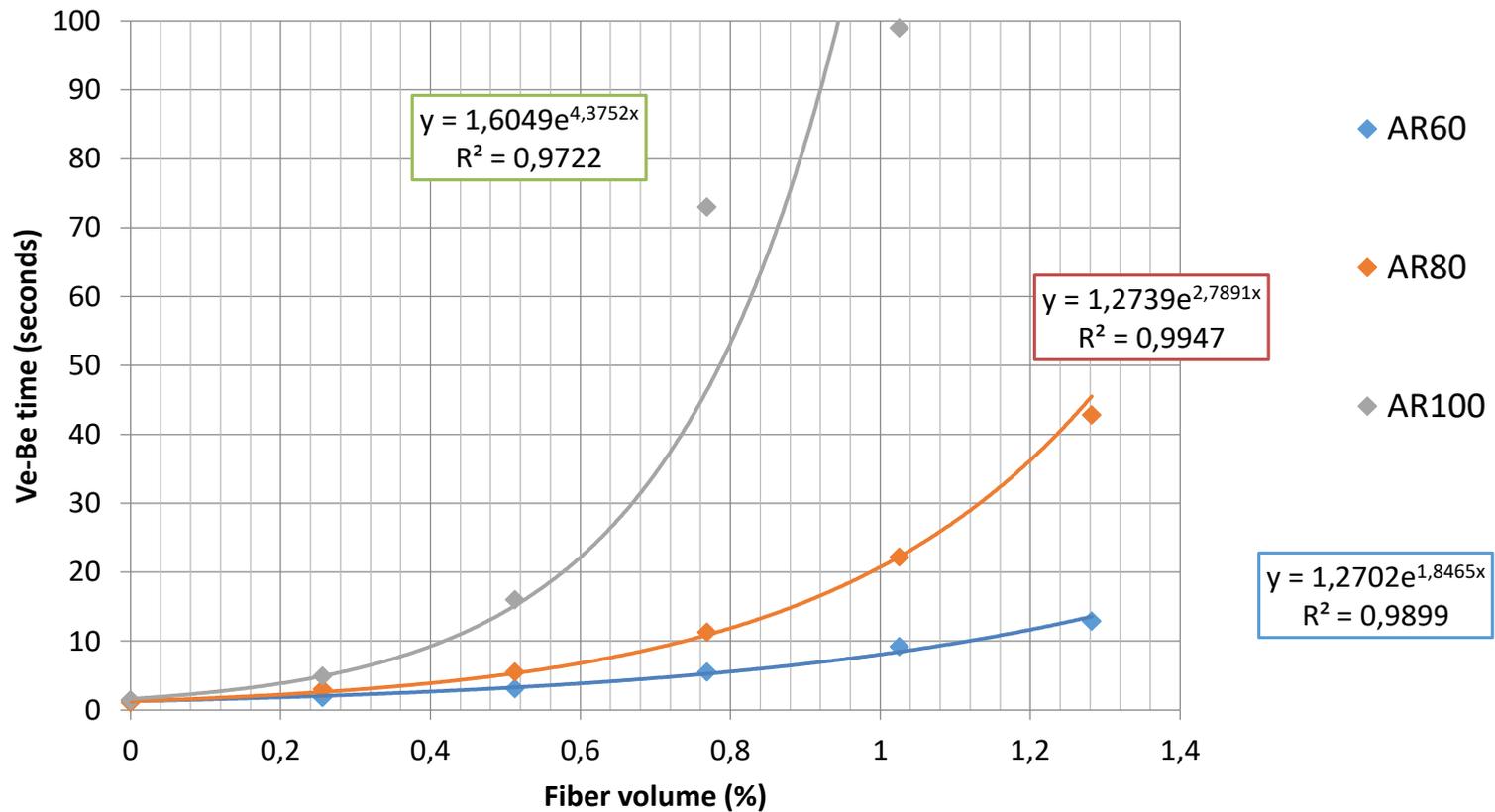
- FIGUEIREDO, A.D.; CECCATO, M. R. Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Slump and Ve-Be Test. Materials Research, p. 1, 2015.



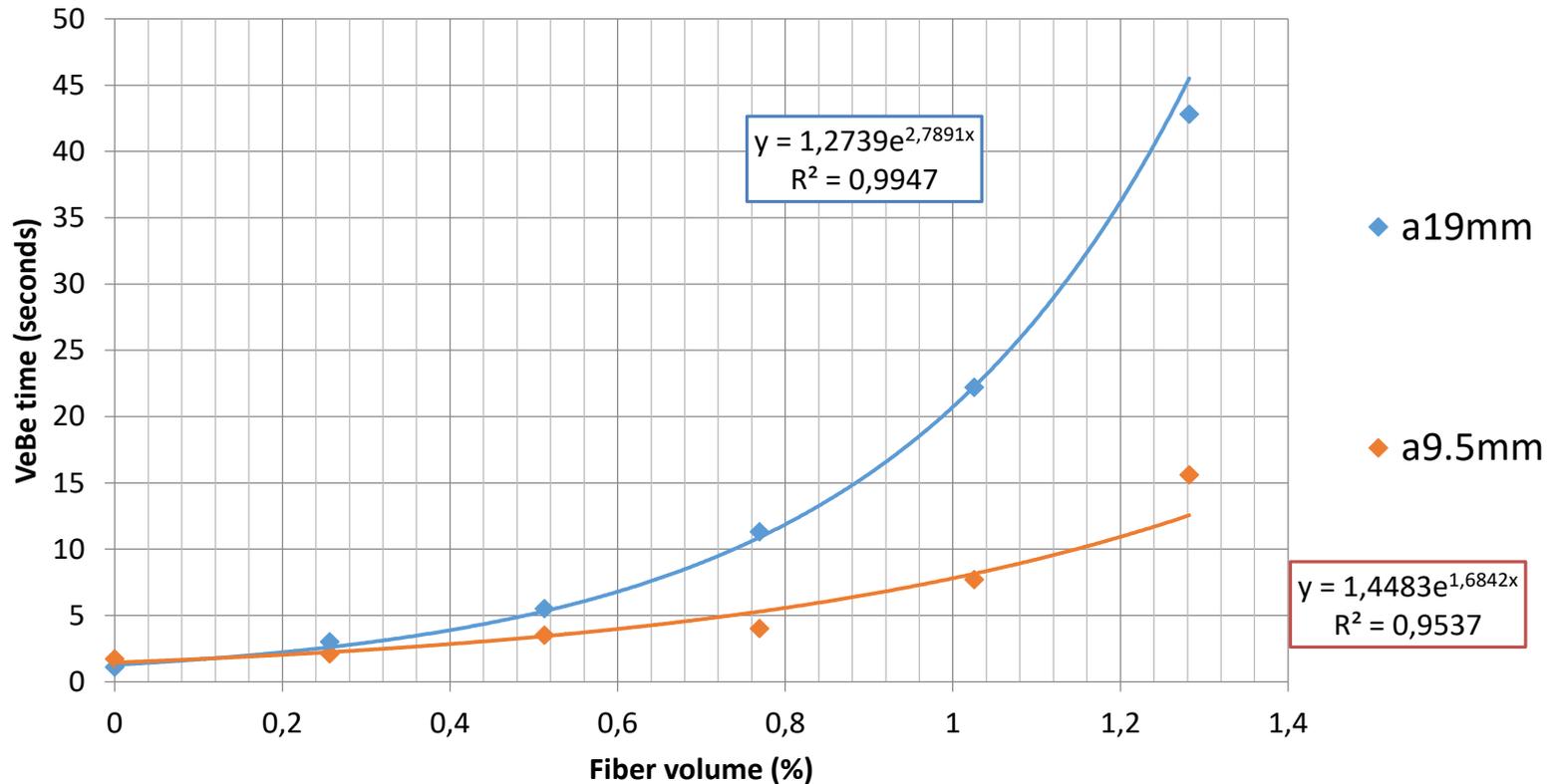
Fibras reduzem slump do concreto



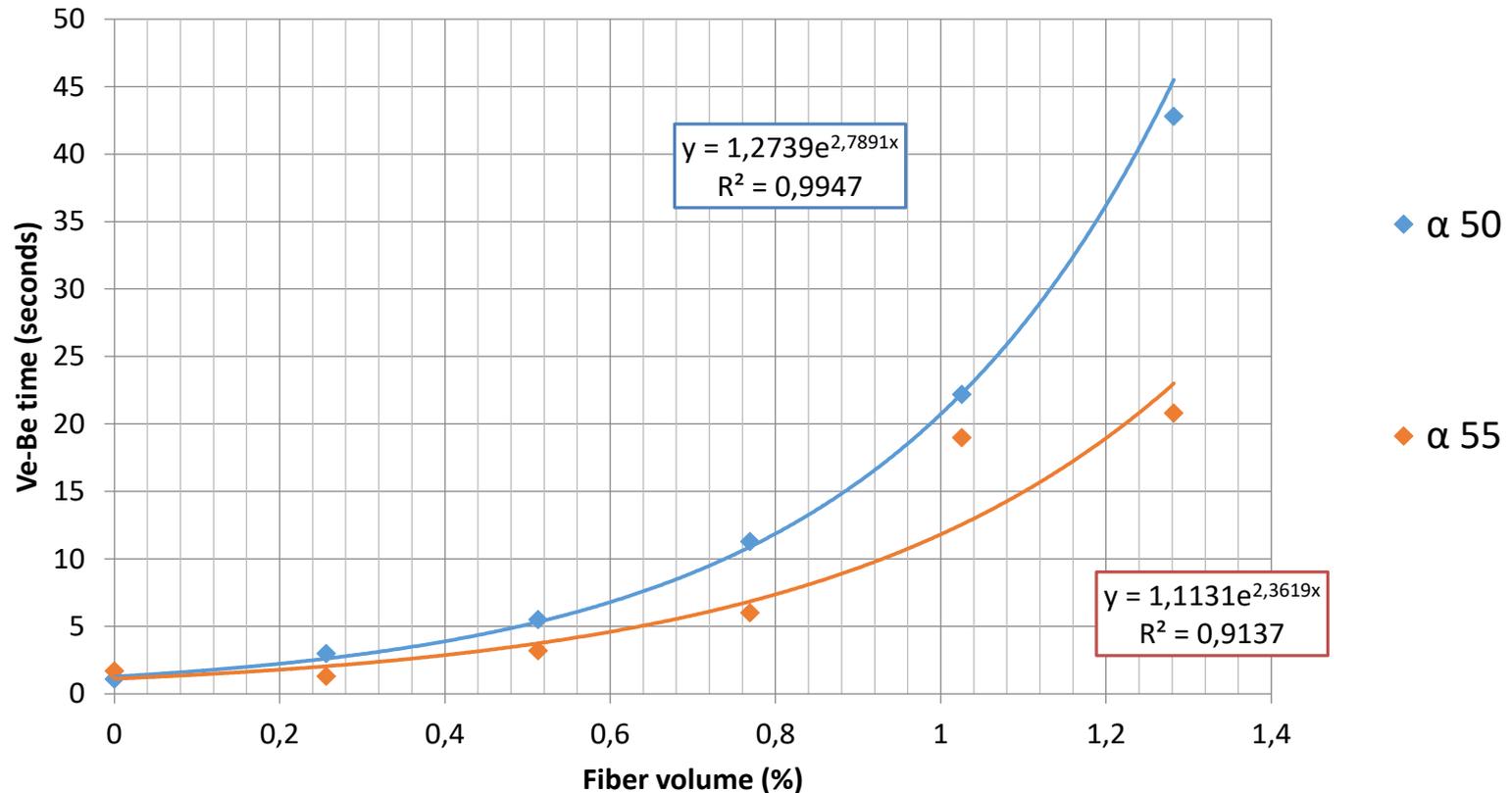
Fibras dificultam a compactação do material



Fibras dificultam a compactação do material: pior com agregados maiores



Fibras dificultam a compactação do material: melhor com maior volume de argamassa



Trabalhabilidade e mistura



“Ouriços”
(embolamentos)

As fibras só são utilizadas
para reforçar matrizes
frágeis?

Fibras de polipropileno para fins não estruturais

- Não degradam
- Alguns afirmam que controlam fissuração no estado fresco
- Incremento da resistência a impactos
- Reduz exsudação (TANESI, 1999)
- Evitam o **lascamento** explosivo no caso de incêndio



Grande preocupação internacional e relativamente ignorada por aqui:

Incêndios em túneis

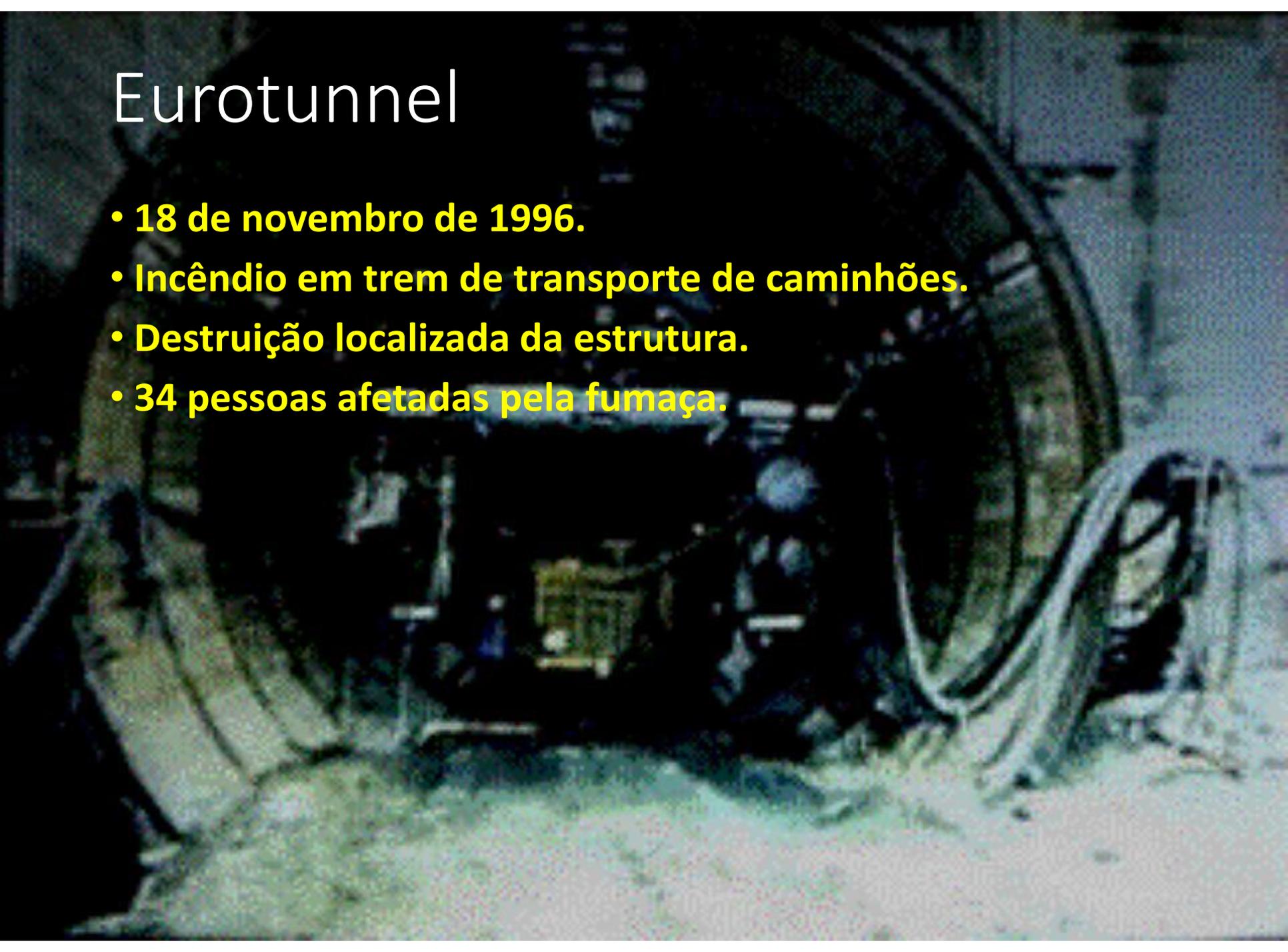
Los Angeles



- **13 de julho de 1990**
- **Tutor Saliba/Perini LA metro Rail Red Line**
- **Colapso do túnel em construção**

Eurotunnel

- **18 de novembro de 1996.**
- **Incêndio em trem de transporte de caminhões.**
- **Destruição localizada da estrutura.**
- **34 pessoas afetadas pela fumaça.**





- Sistema construtivo: ‘shield’
- Bielas foram totalmente destruídas



Mont Blanc

- **Divisa da Itália com a França**
- **24 de março de 1999**
- **41 vítimas fatais**



Mont Blanc



Mont Blanc



OAKRIDGE

- Maio de 1999
- 5 dias de incêndio em túnel ferroviário da Union Pacific Railroad
- Sem vítimas mas com grandes prejuízos

Salzburg

- 29 de maio de 1999
- Tauern Tunnel
- Um morto e 71 feridos
- O fogo iniciou-se a partir da colisão de um caminhão de transporte de tintas



Tauern Tunnel

- Temperatura no túnel superou os 1000°C e provocou danos na estrutura



AUSTRIA Funicular pega fogo na estação de Kitzsteinhorn deixando quase todos os passageiros presos no túnel, só il escapam

Incêndio pode ter matado 170 esquiadores

— de 170 pessoas presas no túnel, apenas um fugiu — e 110 morreram. Segundo a polícia austríaca, o incêndio começou na estação de Kitzsteinhorn, perto de Innsbruck, no Tirol. Apesar das precauções, os esquiadores estavam deitada no túnel e não puderam escapar. Os bombeiros e todos os outros funcionários...



se estendeu para o túnel. A todos 1.000 metros de (18) que o túnel acaba sempre em chamas porque acaba sempre dentro do túnel de um do túnel, incluindo no topo do túnel. Foram enviados 11 helicópteros para ajudar a retirar os feridos. A polícia pediu que os esquiadores fossem para o túnel para evitar que os bombeiros fossem para dentro do túnel.

Estados Unidos estão sendo investigados por a falta de um plano de segurança. O governador de Colorado, Bill Owens, disse que a segurança de Kitzsteinhorn não estava adequada para o túnel. O plano de segurança não estava adequado para o túnel e não estava adequado para o túnel.

uma série de 190 km a oeste de Innsbruck, na região de Kitzbühel, onde se encontra a estação de Kitzsteinhorn. Segundo ele, a segurança não estava adequada para o túnel. A polícia pediu que os esquiadores fossem para o túnel para evitar que os bombeiros fossem para dentro do túnel.

Um resgate de um grupo de pessoas aconteceu após o incêndio. Os bombeiros foram para o túnel de Kitzsteinhorn, que ligava a estação de Kitzsteinhorn à estação de Kitzbühel. Uma equipe de bombeiros chegou ao túnel e encontrou os esquiadores presos. Os bombeiros foram para o túnel para evitar que os esquiadores fossem para dentro do túnel.

MULTIMÍDIA

The New York Times - 11 Nov 2000

Entrada na Indonésia filme de 82 sobre a queda de Sukarno

Uma história de 82 minutos sobre a queda de Sukarno em Indonésia foi lançada ontem, segundo um comunicado.



- Kitzsteinhorn, Austria.
- 11/11/2000

155 esquiadores morrem no incêndio

- Extensão do túnel: 3,2km
- 12 pessoas sobreviveram por estarem na parte de trás do trem
- Outras 155 morreram porque as portas do trem não se abriram



Túnel São Gotardo

- Suíça na região de Ticino
- Outubro de 2001
- 11 mortos
- Destruição da estrutura



Túnel São Gotardo



Túnel São Gotardo



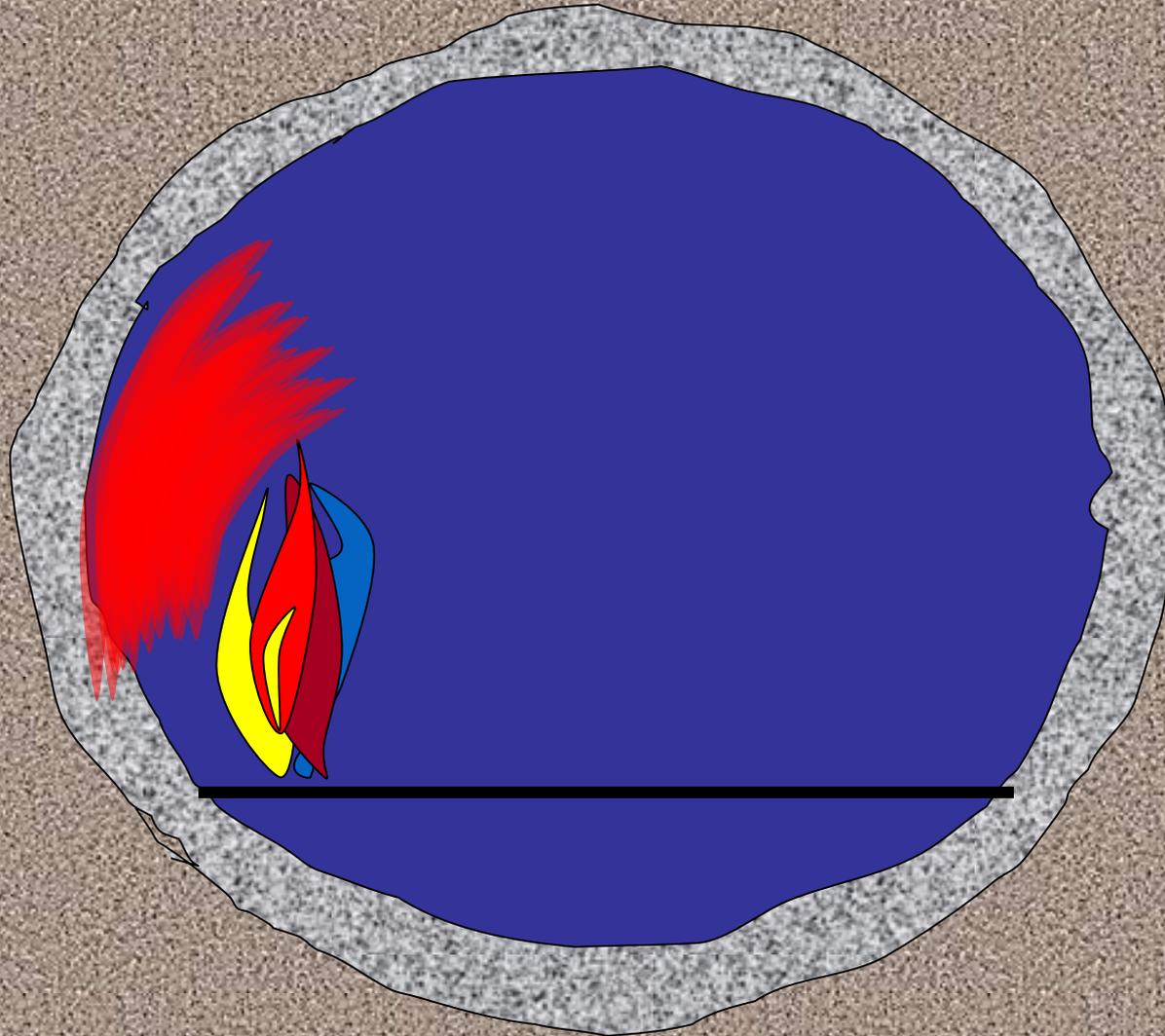
Um exemplo nacional: Metrô de SP

- Agosto de 2001.
- Ocorreu incêndio na linha leste-oeste, causado pelo rompimento de um cabo de energia.
- Felizmente o fogo foi controlado rapidamente e houve apenas uma vítima fatal e 26 feridos,
- A tragédia poderia ter sido muito maior.

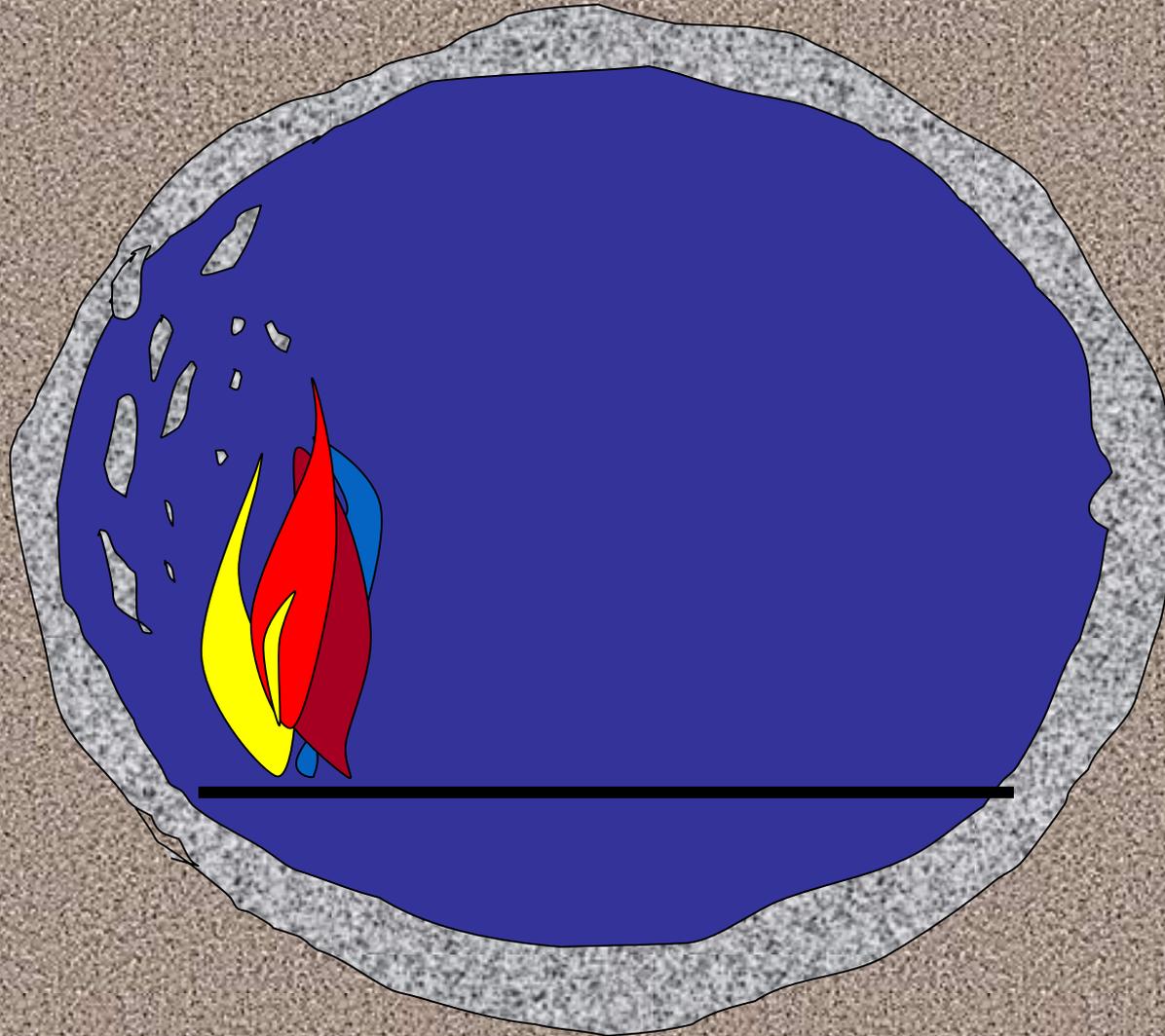
Incêncio Rodoanel de SP em 2016



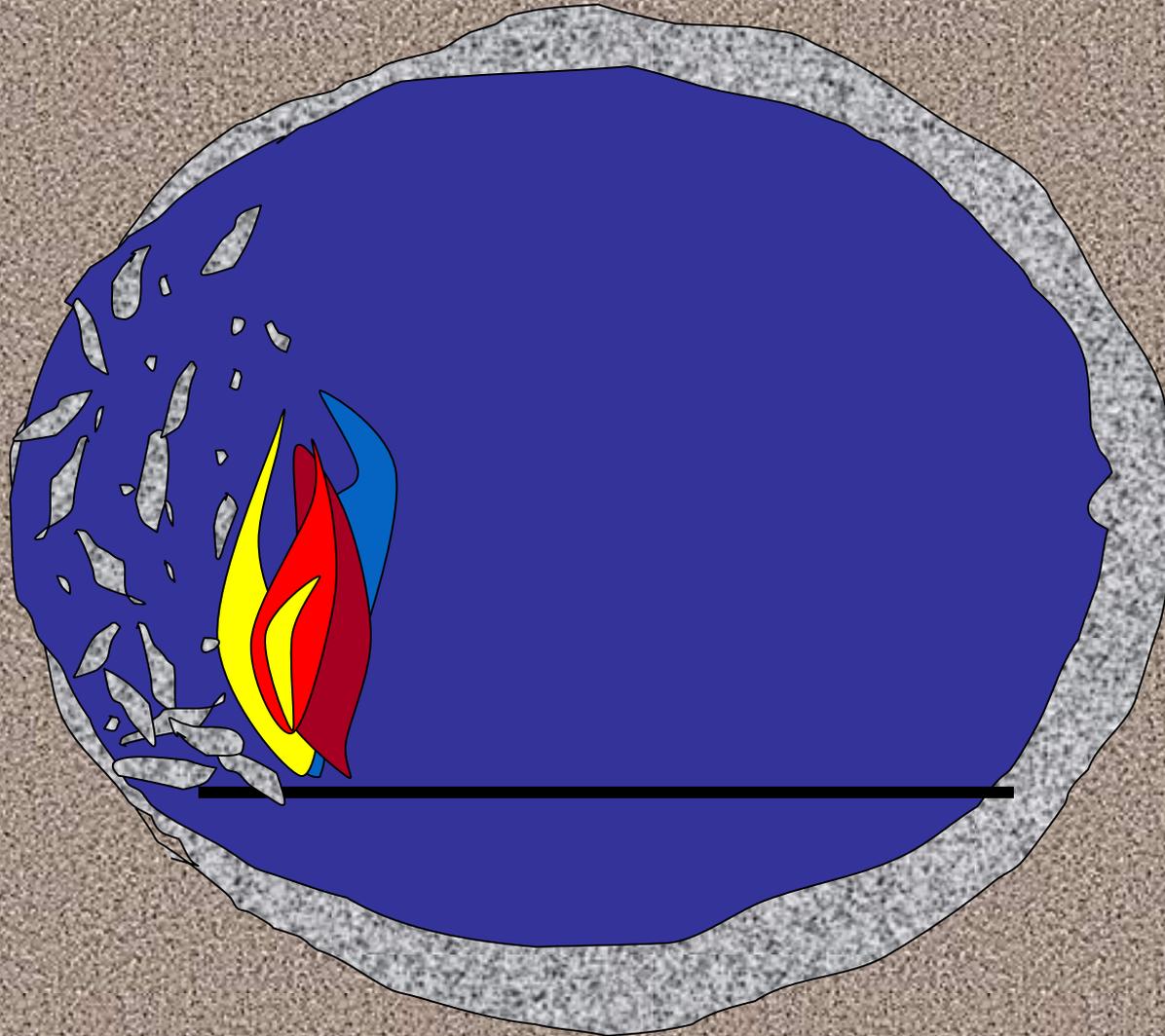
Incêndio no túnel



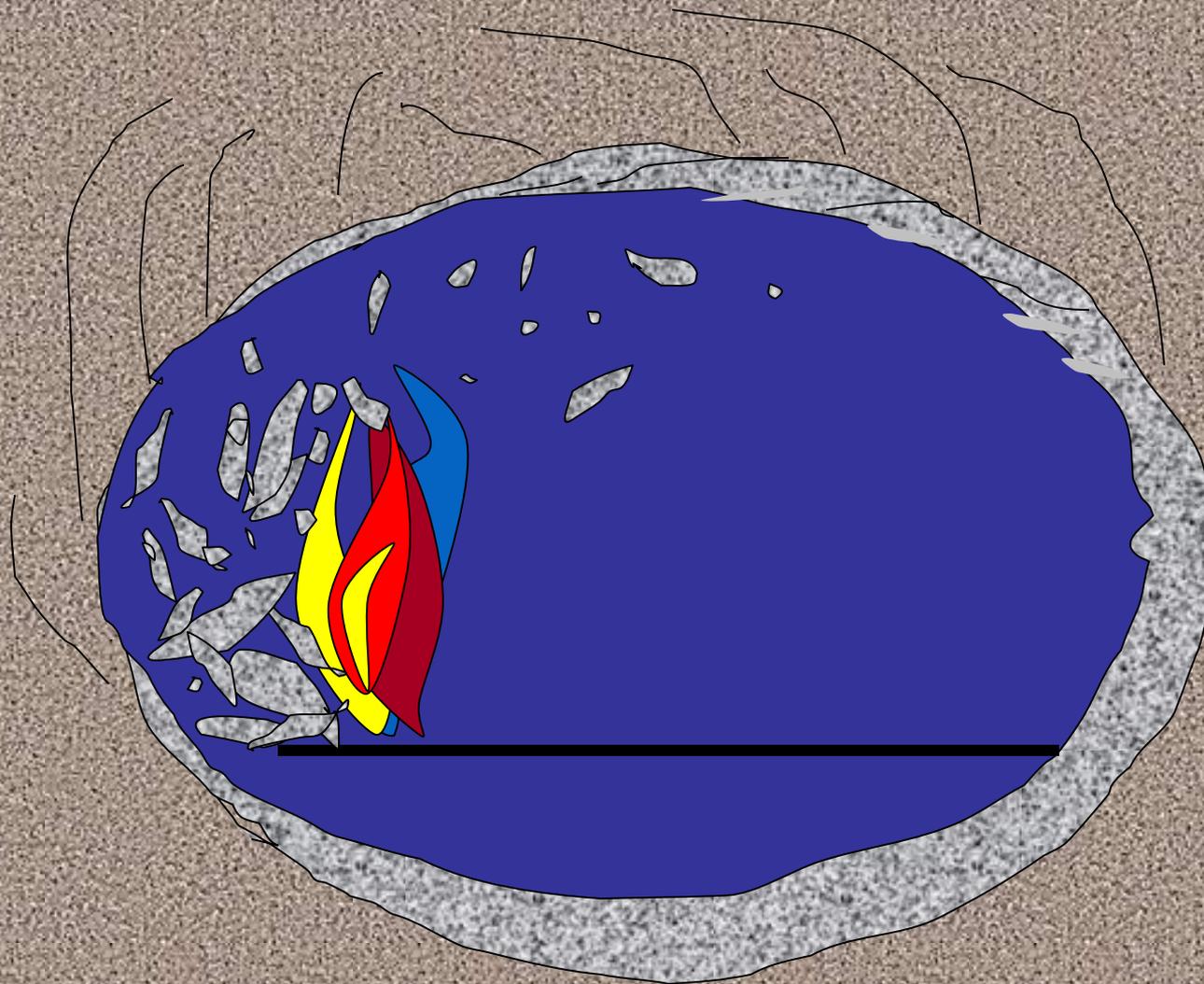
Incêndio no túnel



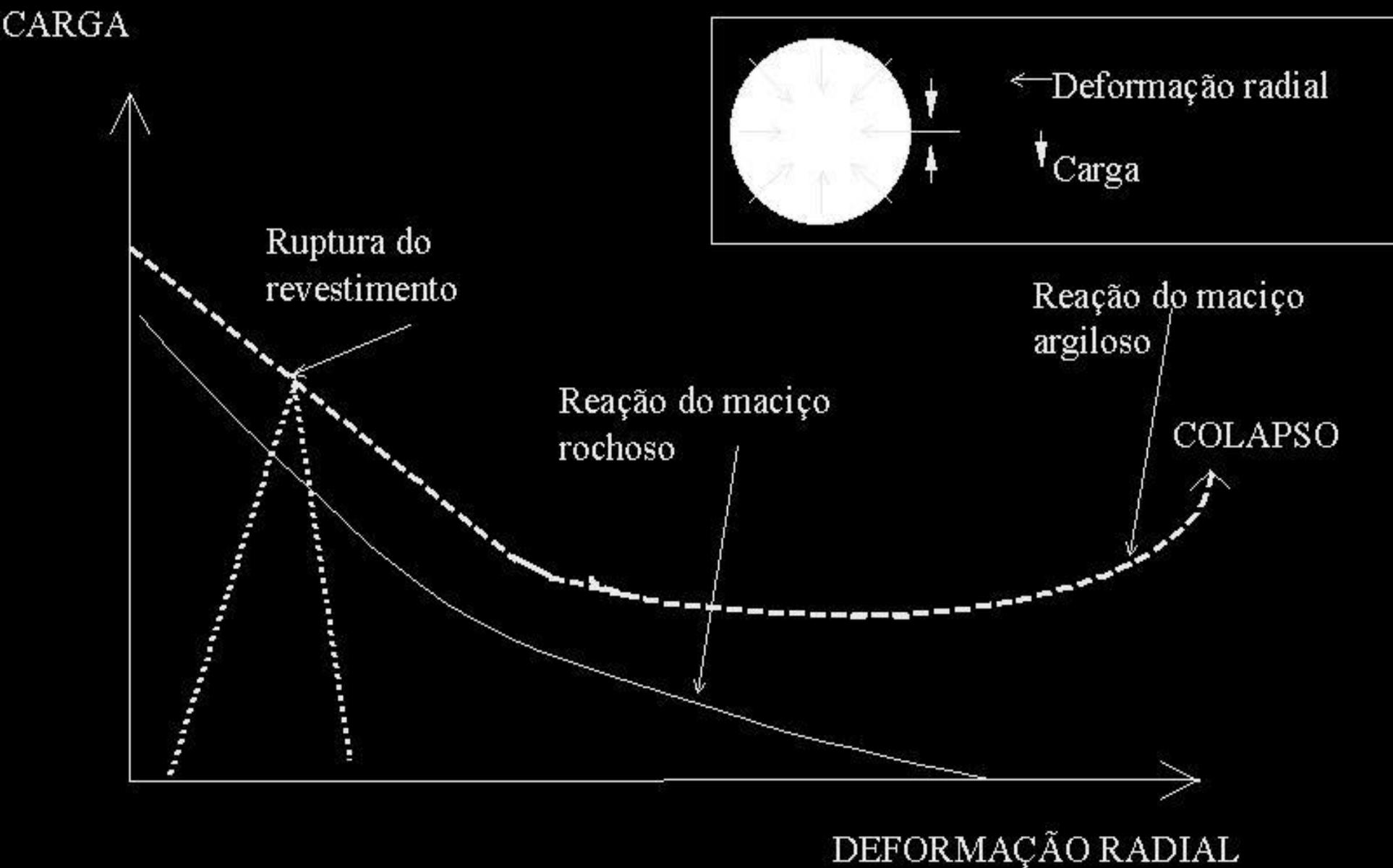
Incêndio no túnel



Incêndio no túnel



Modelo de RABCEWICZ



Efeito na superestrutura



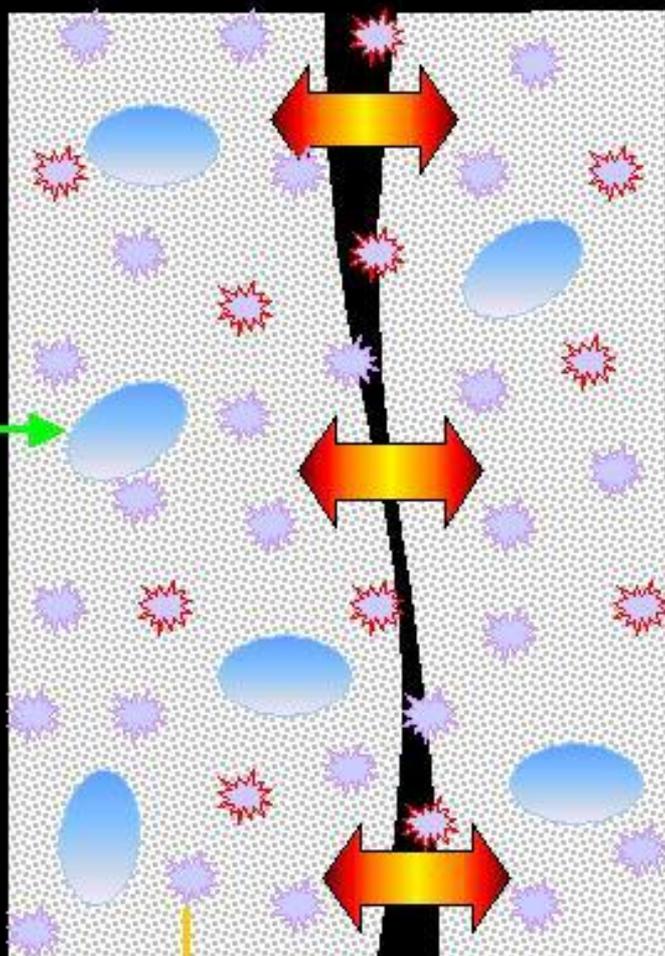
Fibras de polipropileno

- Incremento da resistência a impactos
- Evitam lascamentos
- Reduzem fluidez da mistura (perda de água da pasta por “molhagem” da fibra)
- Uso em argamassas e concretos de elevada coesão
- Proteção contra ação do fogo

Ação das fibras sintéticas em incêndios

- Quando se fundem permitem a saída do vapor de água
- Minimizam lascamento da estrutura
- Evitam colapso imediato
- Permitem atividades de recuperação da estrutura com maior segurança e simplicidade

Concreto sem fibra



água livre

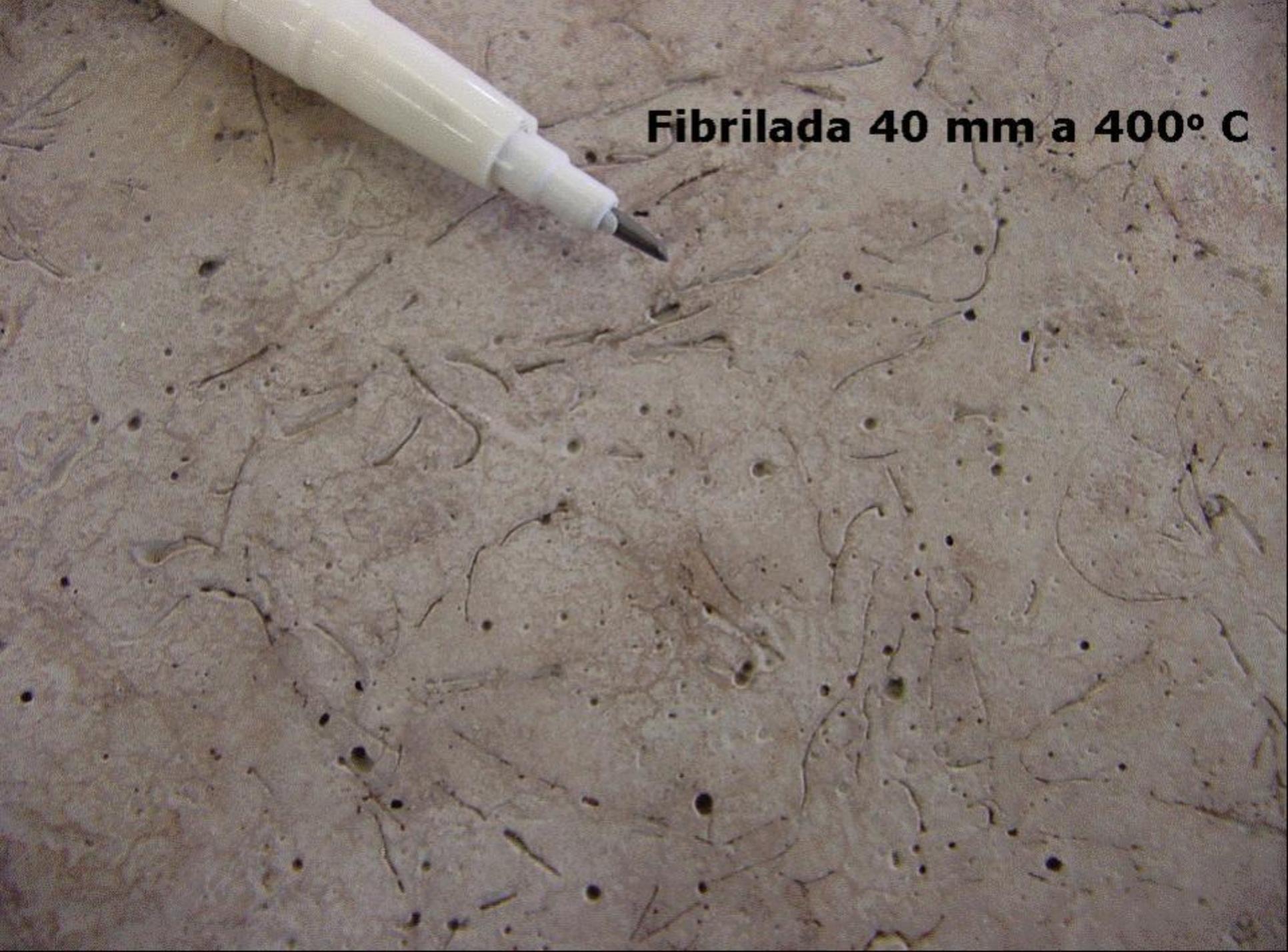
água química e fisicamente combinada condensada

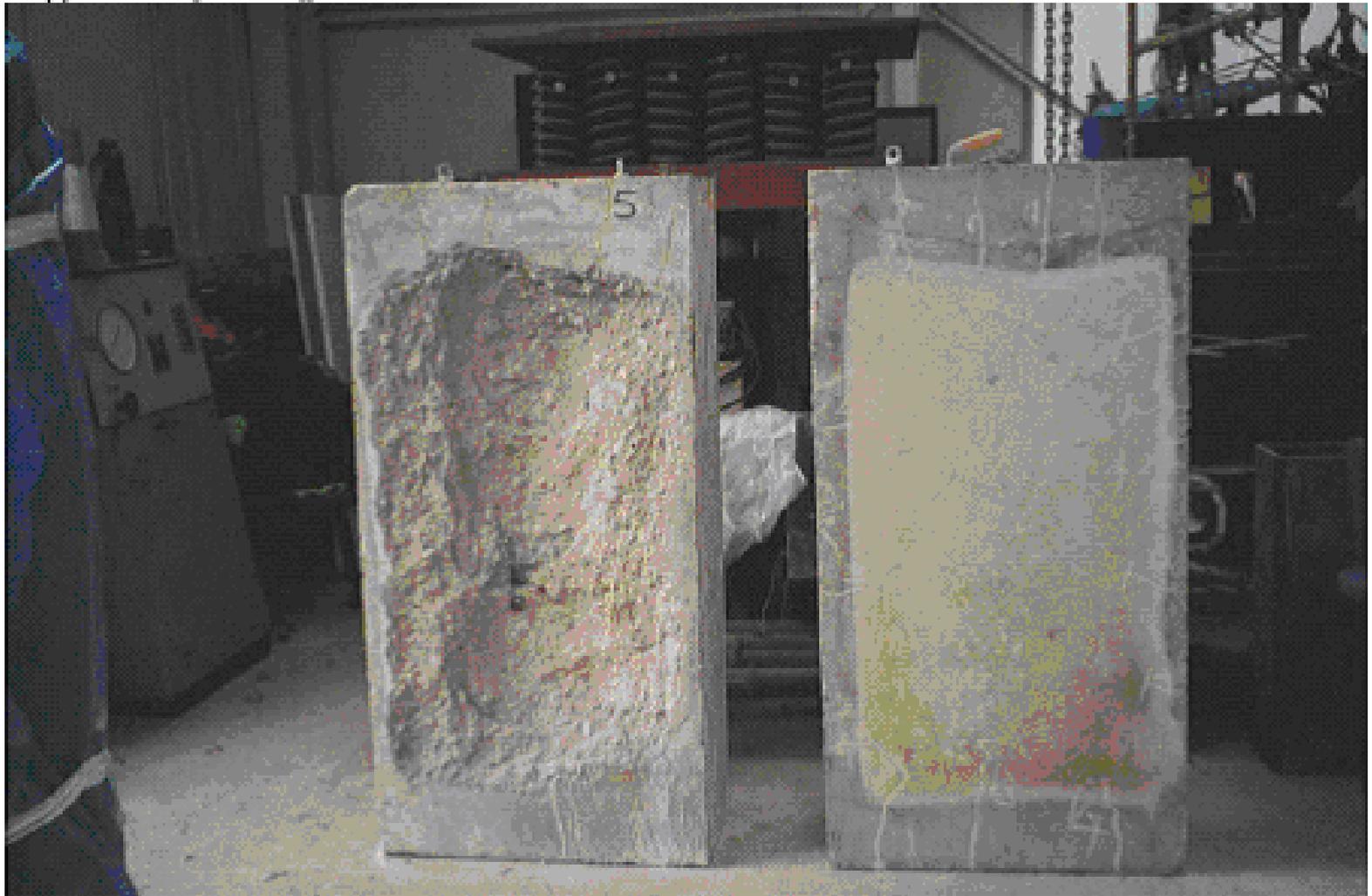
Concreto com fibra



fibras de polipropileno fundidas permitem aliviar a pressão de vapor dos poros

Fibrilada 40 mm a 400° C





CONTROL

WITH POLPROPYLENE
FIBRES

Conclusões da aula:

- Para bem utilizar os compósitos deve-se compreender seus fundamentos.
- O comportamento básico do compósito depende da interação entre fibras e matriz.
- O resultado dessa interação depende das características das fibras e da matriz.
- Logo: **controle do compósito é fundamental.**