

O papel dos concretos especiais nas obras de infraestrutura

Antonio D. de Figueiredo

Novas demandas tecnológicas

- ◆ A tecnologia do concreto atual apresenta novas demandas em relação à tradicional
- ◆ Obras de infraestrutura apresentam demandas específicas
- ◆ Necessidade de atualização constante do usuário

Novas demandas tecnológicas

- ◆ Impacto ambiental
- ◆ Novos materiais (aditivos, fibras, adições, etc.)
- ◆ Novas aplicações (processos e produtos)
- ◆ Consequências:
 - ◆ **“Concretos especiais”**
 - ◆ **“Reformulação”** da abordagem do concreto convencional

CONCRETOS ESPECIAIS

- ◆ Concretos com características particulares devido à evolução tecnológica:
 - ◆ Melhorando as deficiências do concreto convencional ou incorporando propriedades não inerentes a este material

Exemplo:



CONCRETOS ESPECIAIS

- ◆ Concretos com características particulares para atender necessidade das obras:
- ◆ Desenvolvimento de produtos para serem empregados em locais/condições em que o concreto convencional não atende todas as exigências

NRC's regulations requiring minimizing contact of the waste with water are fulfilled by requiring the waste to be placed above the level of the highest water table fluctuation and above the drainage layers where leachate would collect. The bottom elevation of the solidified Mixed LLW would be required in all instances to be at elevations above the top of the perimeter berm.

Figures 3 and 4, illustrate the design concepts for the final cover over the solidified waste zone and the perimeter berm.

The actual zone for placement of solidified Mixed LLW consist of different options, depending on the licensee's selection. Options that would be acceptable include use of stable high integrity waste containers (HICs) that have the spaces between containers filled with cohesionless, low compressible fill material or placement of the waste in an engineered structure, such as a reinforced concrete vault.

Figure 4 shows a cover system over the waste that would be acceptable to the EPA and NRC. The cover system would consist of the following layers:

1. an outer rock or vegetative layer to minimize erosion and provide for long-term stability
2. a filter and drainage layer that transmits infiltrating water off of the underlying low permeability layers
3. an impervious flexible membrane liner overlaying a compacted low permeability clay layer
4. a filter and drainage layer beneath the compacted clay layer.

If the solidified waste zone does not include a roofed, engineered vault structure, an additional compacted clay layer should be placed immediately above the emplaced waste. This will direct any water infiltration away from the waste zone. When the Mixed LLW contains waste designated by NRC as Class C waste, there must be sufficient thickness of cover materials or an engineered intruder barrier to ensure protection against inadvertent intrusion.

Variations on this design approach may include placement of the Mixed LLW in an engineered reinforced concrete vault, a steel fiber polymer-impregnated concrete vault, or double-lined high integrity containers that are hermetically sealed. If proposed by license applicants, these variations would be reviewed by both the EPA and NRC on a case-by-case basis.

↑ Top of page

Figure 2
(Click figure for larger image.)
Details of the perimeter berm, liners, and leachate collection system.

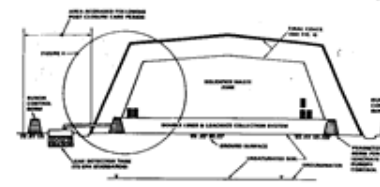


Figure 3
(Click figure for larger image.)
Cross-section of the covered portion of the disposal unit

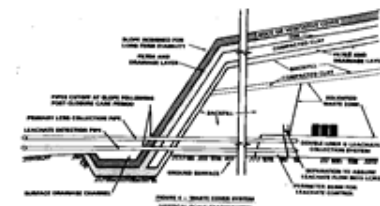


Figure 4
(Click figure for larger image.)
The final cover system.

Exemplos de concretos especiais:

- ◇ Polímeros
- ◇ Pesados e leves
- ◇ de alta resistência (“alto desempenho”)
- ◇ Autoadensáveis
- ◇ **Concretos secos**
- ◇ **Massa & compactado com rolo**
- ◇ **Projetado**
- ◇ **Com fibras**
- ◇ **Com agregados reciclados**

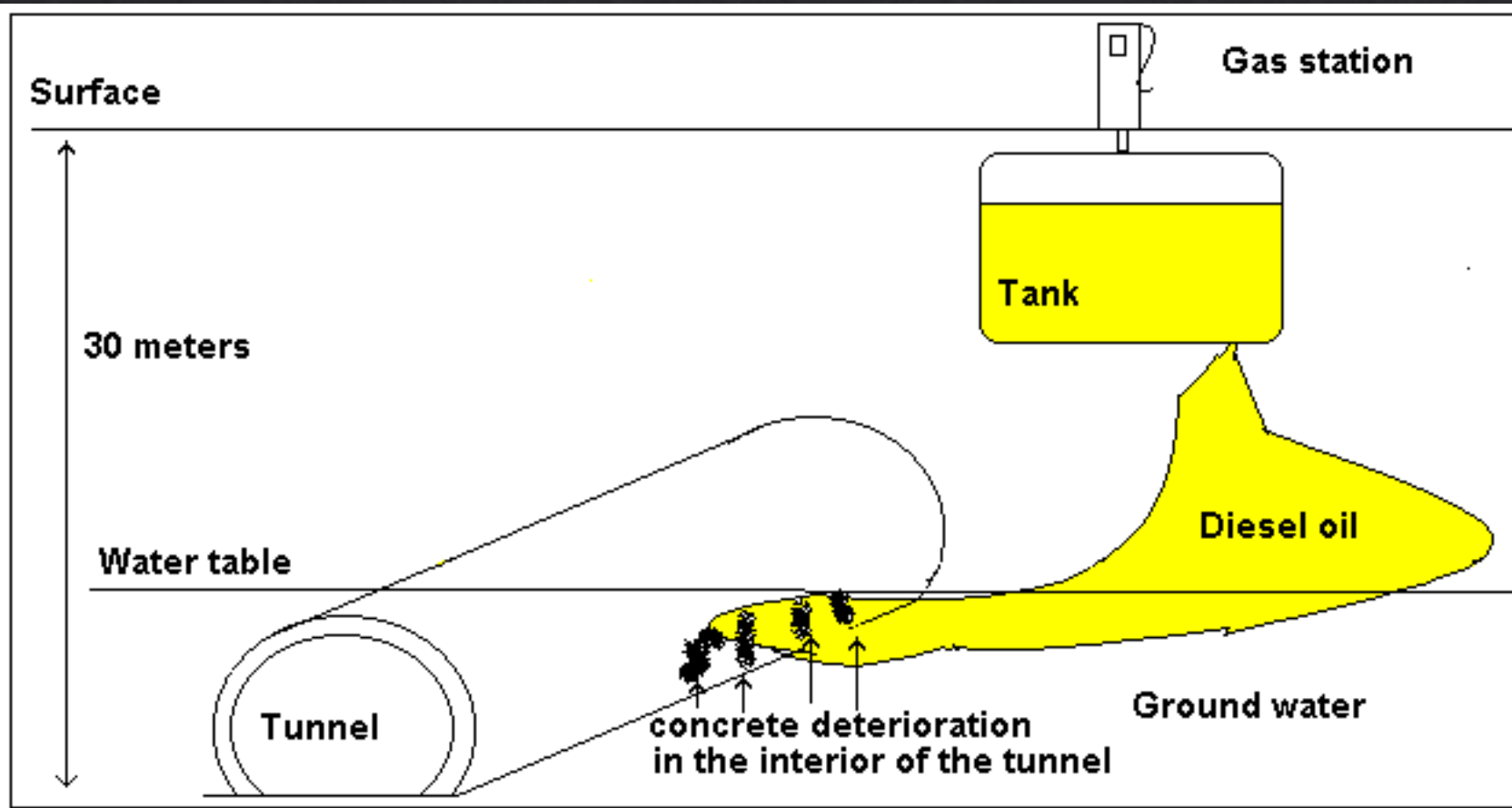
Concretos polímeros

- ◇ Concreto de polímero (CP)
 - ◇ O aglomerante é de base polimérica
- ◇ Concreto modificado com látex (CML) ou *Polymer Cement Concrete* (PCC)
 - ◇ Substituição de parte da pasta por látex (emulsão polimérica solubilizada em água) em cerca de 1%
- ◇ Concreto impregnado com polímero (CIP) ou *Polymer Impregnated Concrete* (PIC)
 - ◇ O polímero ou monômero é infiltrado (impregna) o concreto de cimento Portland

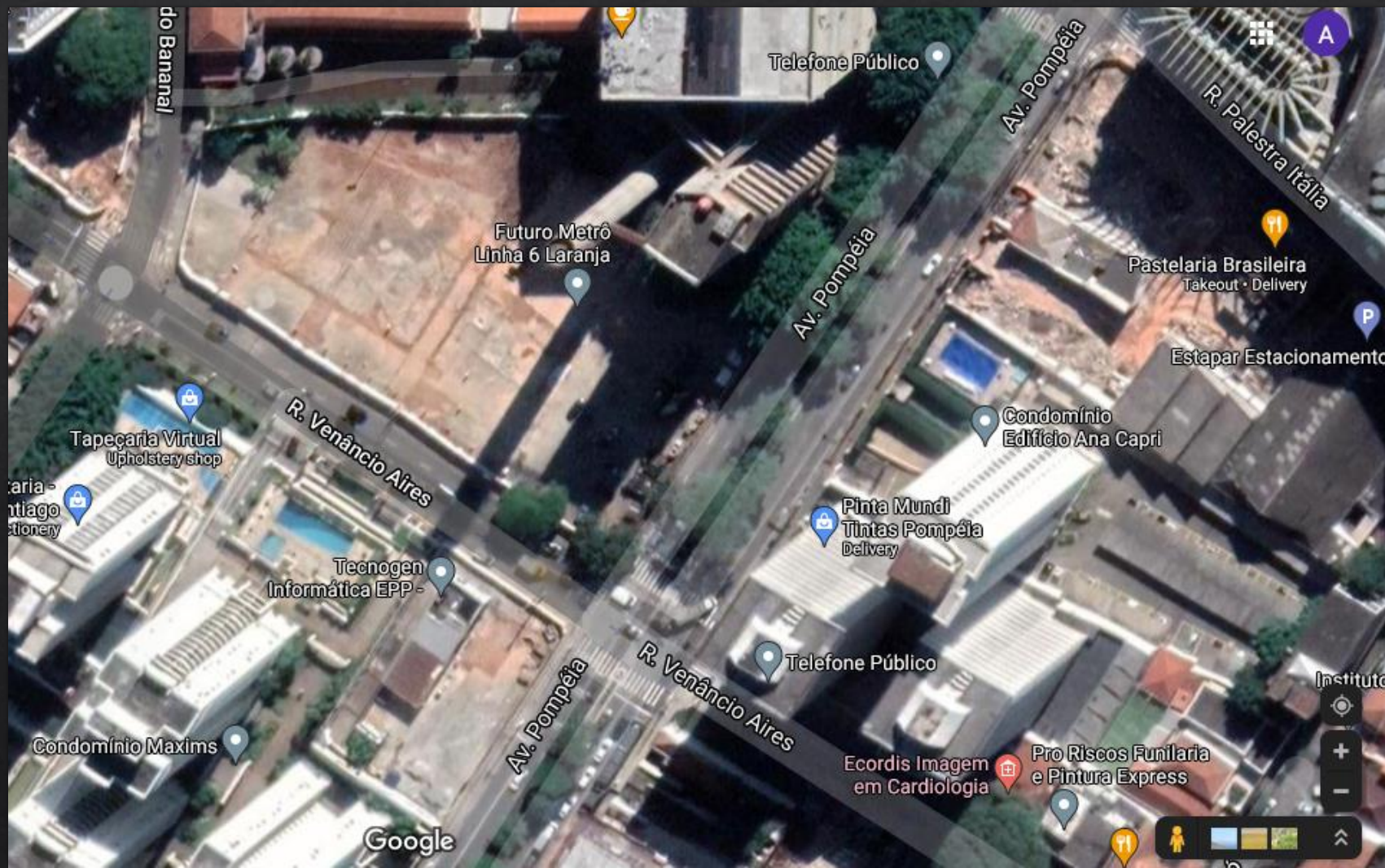
Para
ambientes de
elevada
agressividade

Caso de aplicação de argamassa polimérica

- ◇ Metrô de SP, linha 2 → pH~5 produzida por colônias de bactérias e fungos



O Metrô de SP e os postos de combustível...



CONCRETOS PESADOS

- ◆ Usos:
 - ◆ Blindagem biológica nas usinas nucleares, unidades médicas
 - ◆ Lastro/contrapeso.
- ◆ Condicionantes:
 - ◆ Falta de espaço
 - ◆ Radioatividade



<https://www.britannica.com/event/Three-Mile-Island-accident>

Concretos pesados- Características

- ◆ Massa específica = 3360 a 3840kg/m³
- ◆ Mesmos métodos de dosagem do convencional
- ◆ Fôrmas específicas devem ser projetadas
- ◆ TRABALHABILIDADE
 - ◆ Aspereza = f(aspereza do agregado)
 - ◆ Grande risco de segregação
 - ◆ Pré-lançamento do agregado
 - ◆ Agregados com Bo podem retardar pega

Concreto massa

Barragem
de Salto
(1948)



Concreto massa

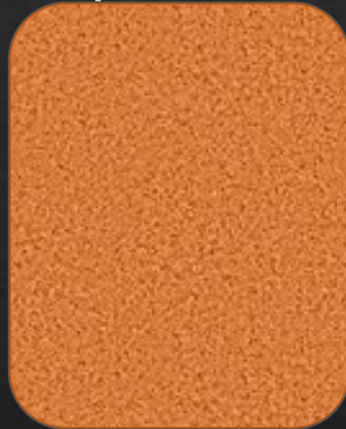
- ◆ Concreto aplicado em grandes volumes o que requer medidas especiais para controle do calor gerado pela hidratação (cimentos especiais) e retração.
- ◆ Agregado de elevada dimensão máxima característica, baixíssimo consumo de cimento (Teor de aglomerantes $\sim 100\text{kg/m}^3$ ou menor).
- ◆ Utiliza a substituição da água de amassamento por gelo.

Controle das tensões térmicas

- ◇ O cimento gera calor durante sua hidratação
- ◇ O concreto é mau condutor e conserva o seu interior aquecido
- ◇ A parte externa perde calor para o ambiente



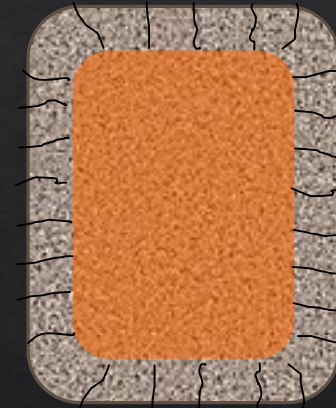
Lançamento do concreto



Aquecimento do concreto pelas reações de hidratação

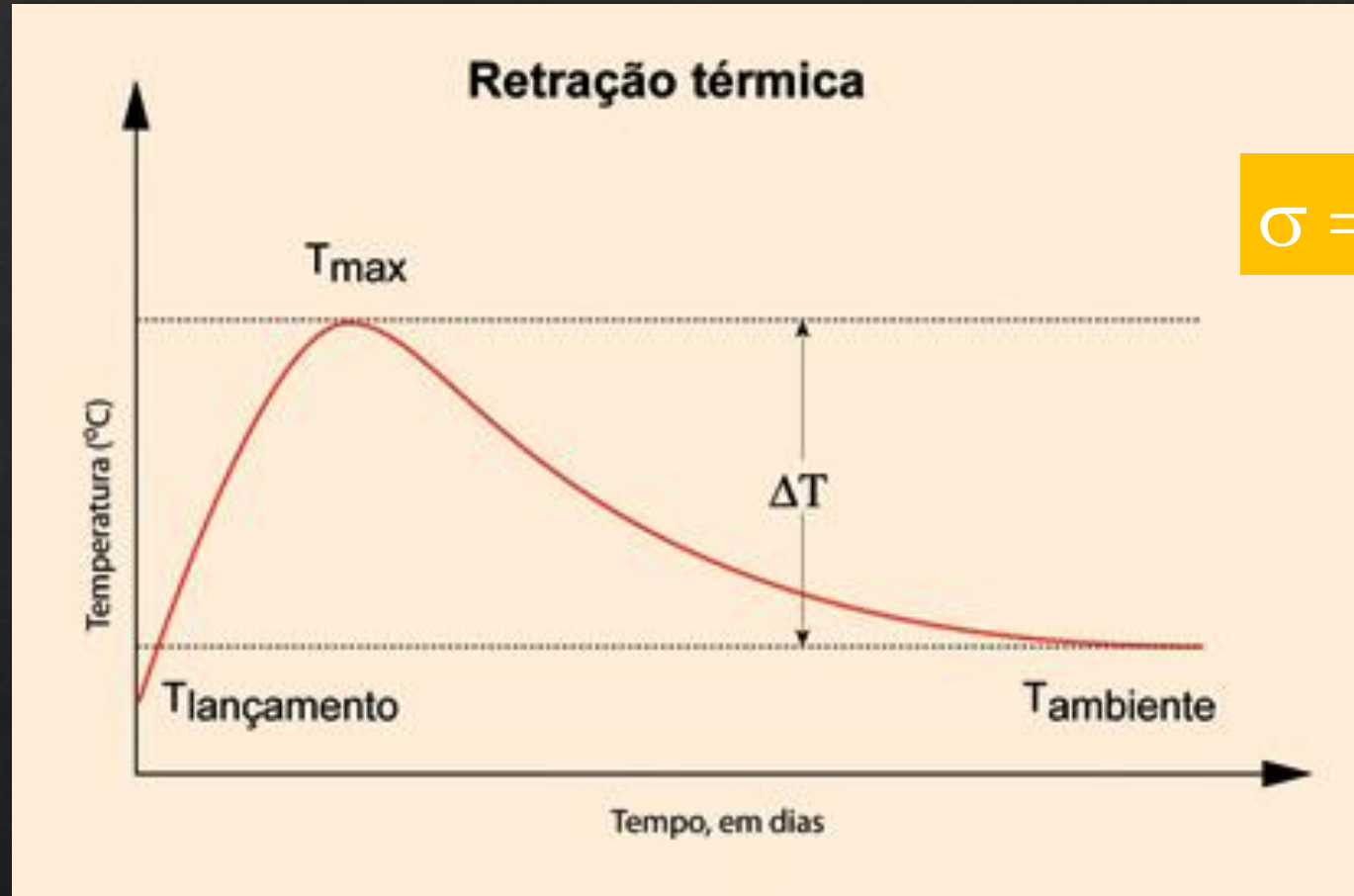


Resfriamento do concreto das bordas para o centro (baixa condutividade)



Retração da superfície com restrição da parte interna gerando fissuração

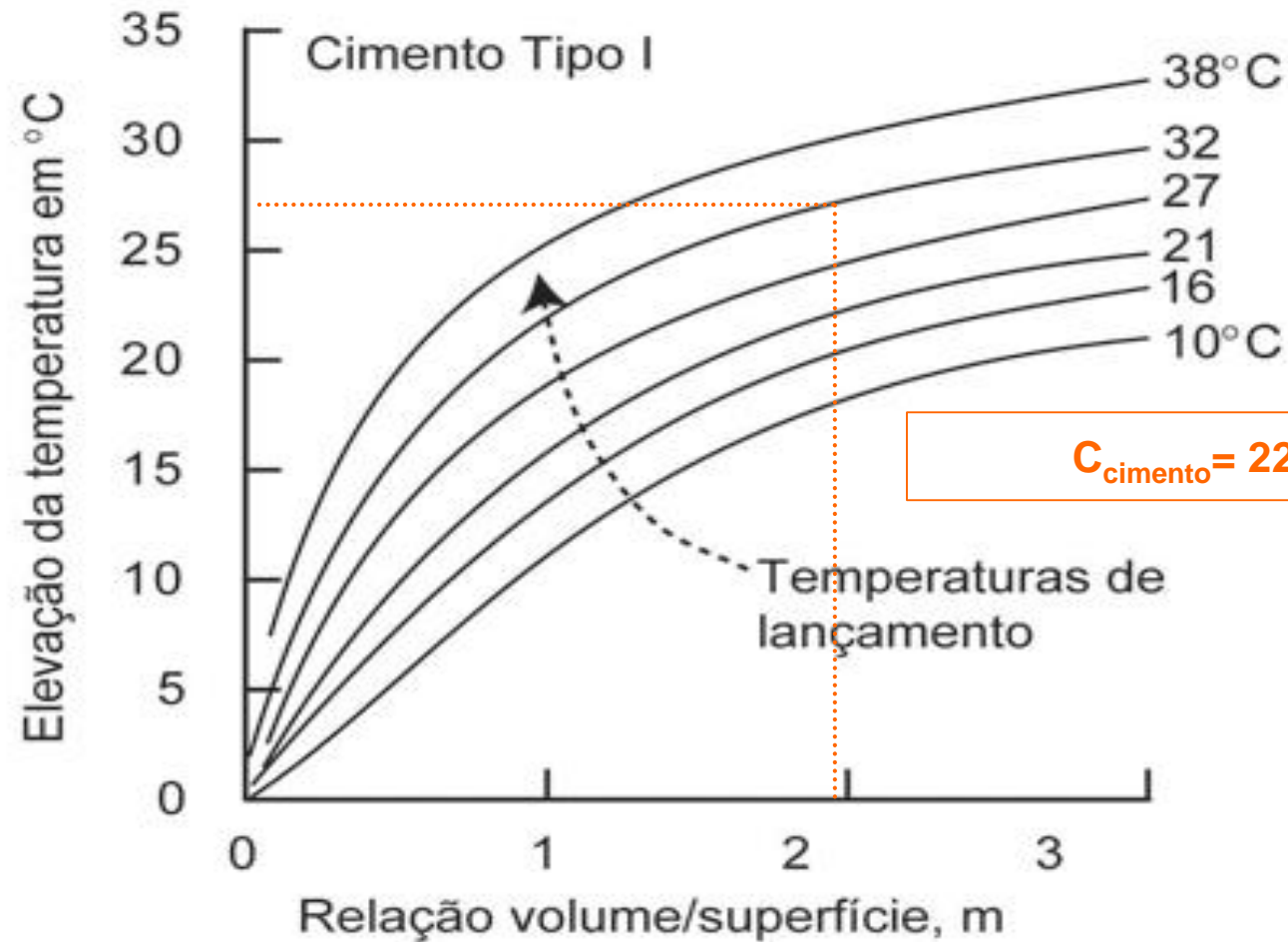
O problema não é a temperatura máxima, mas o gradiente em relação à temperatura de equilíbrio.



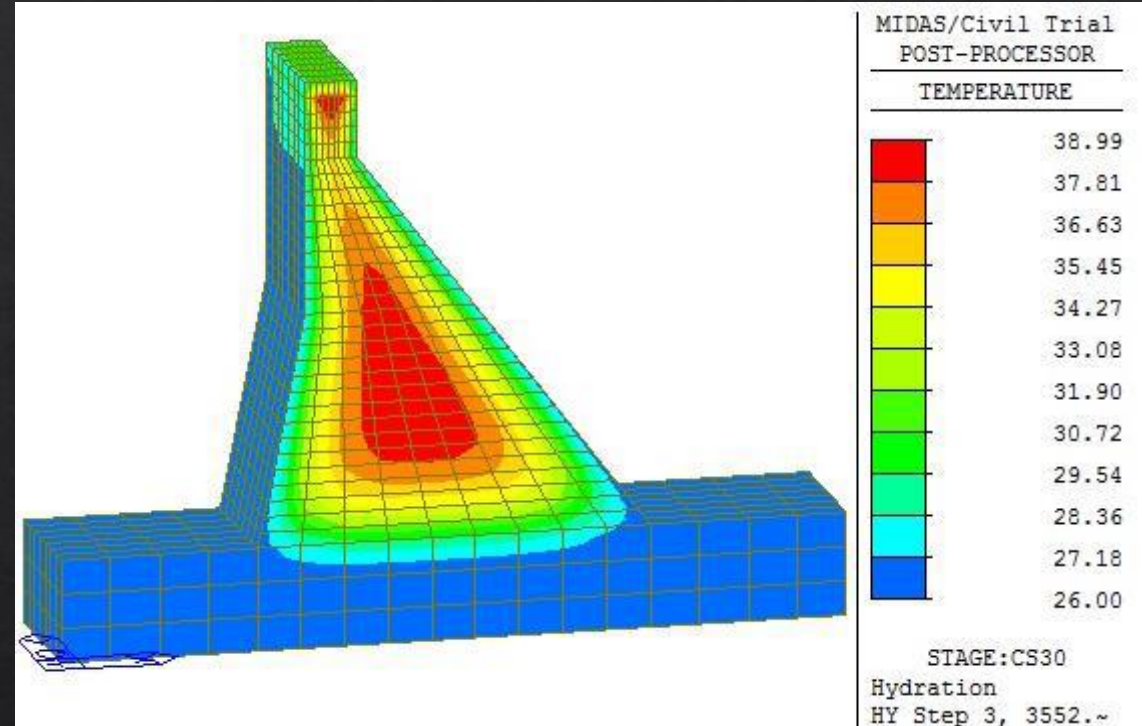
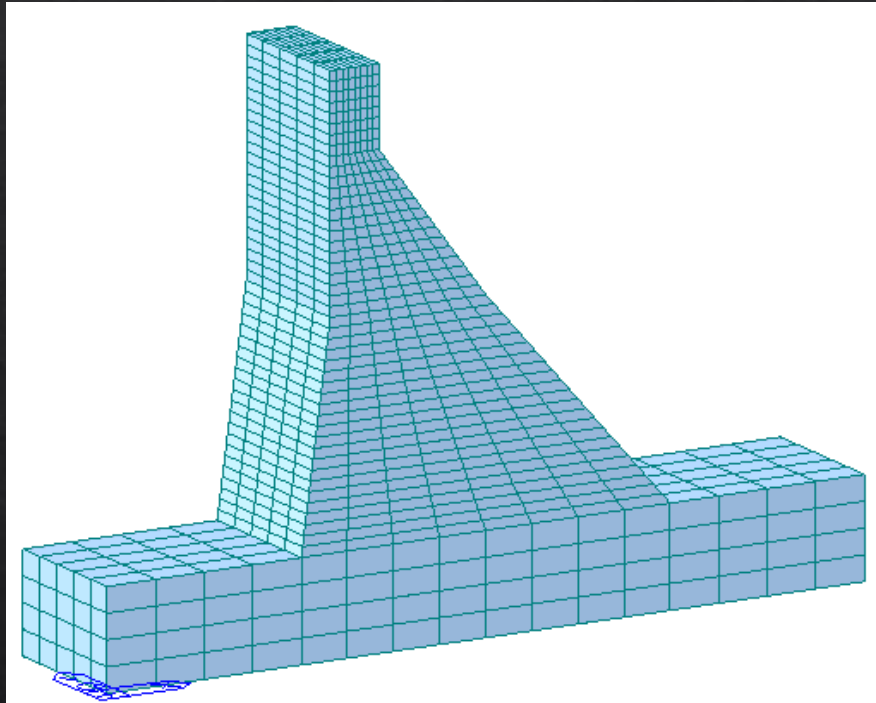
$$\sigma = \alpha \cdot \Delta T \cdot E$$

Fonte: Mehta & Monteiro (2008)

Estimativa da elevação de temperatura do concreto



Estimativa da elevação de temperatura do concreto



Concreto compactado com rolo

- ◆ É um concreto seco cuja compactação é feita por rolos compressores
- ◆ Tem consistência seca (rolo não pode afundar)
- ◆ Dispensa a utilização de fôrmas
- ◆ Pode ter consumo de cimento bem reduzido



<https://www.eduric.com.br/produtos.html>



https://www.elejr.com.br/sustentabilidade/fotos/barragem-ccr_acesso-de-ccr-bl-22-e-23-09-03_05/

Concreto compactado com rolo



Barragem de Tanur, no Rio Jordão



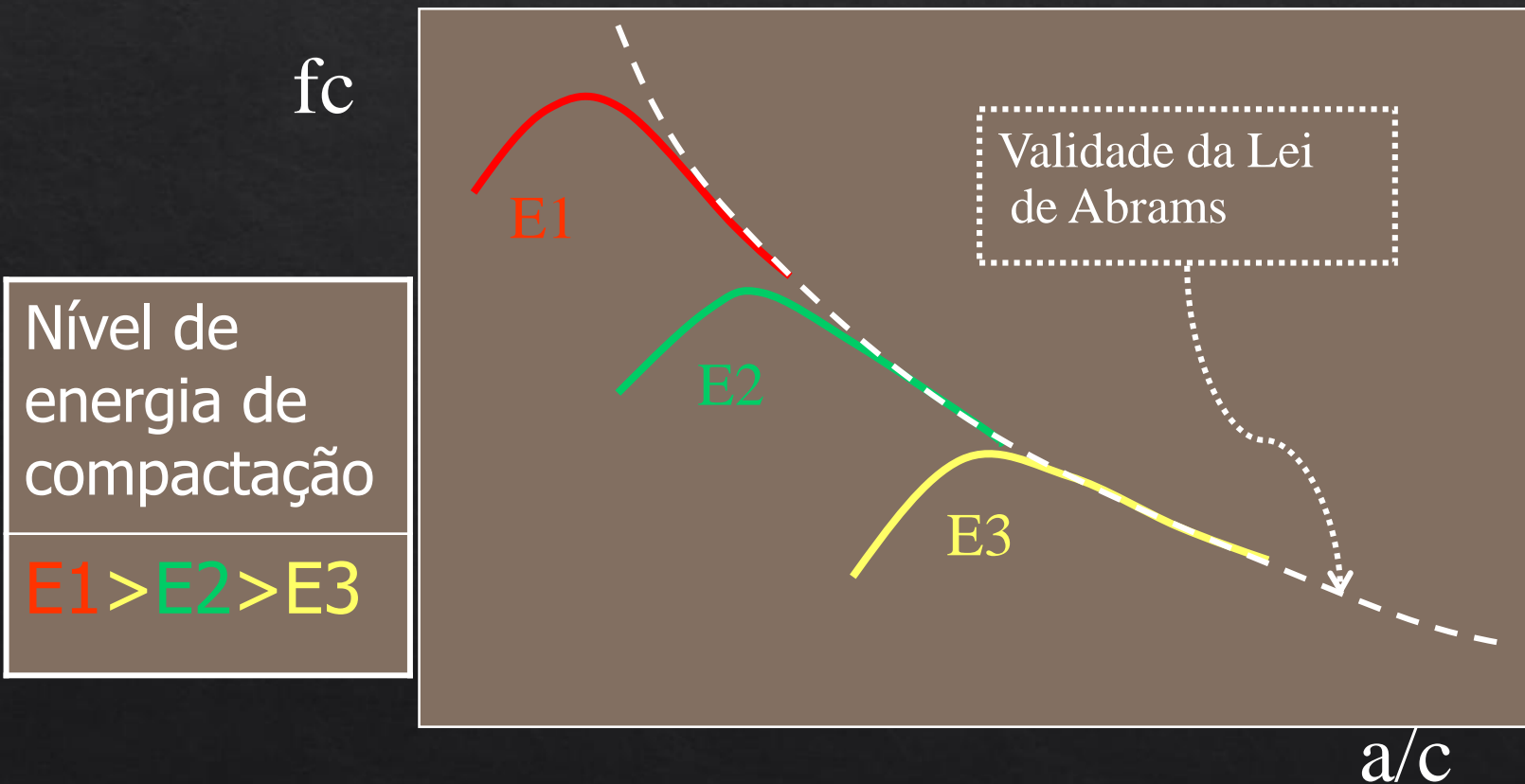
Barragem de Wadi Wala
na Jordânia

Concreto compactado com rolo

- ◆ Como é lançado por camadas minimiza a temperatura máxima originada pelo calor de hidratação
- ◆ O transporte é facilitado (pode ser feito por caminhões basculantes)
- ◆ Utiliza equipamento de terraplenagem normal
- ◆ Reduz o período de execução da obra

Concreto compactado com rolo é um concreto de reologia seca

- ♦ A resistência máxima é obtida para a umidade ótima de compactação (como em solos)



Aguirre, F.; Rojas, O. Calle, J.; Moscoso, A. Consideraciones sobre la dosificación experimental de hormigones en base a materiales característicos de Cochabamba. *Investigación & Desarrollo* 1(13):24-38. 2013.

Concreto compactado com rolo

- ◆ Não é possível reproduzir as condições de moldagem e compactação em laboratório o que implica em dosagem difícil (Furnas já possui infra-estrutura para aplicação de CCR no laboratório)
- ◆ Similar a concreto projetado e concreto para componentes pré-moldados (blocos, tubos, etc.)



Concretos de alta resistência (“alto desempenho - HPC”)

- ◆ Concretos com resistência mecânica à compressão **> 50 MPa** (alterações em outras propriedades e microestrutura).
- ◆ Não “cobertos” pela NBR 6118.

Concretos de alta resistência (“alto desempenho - HPC”)

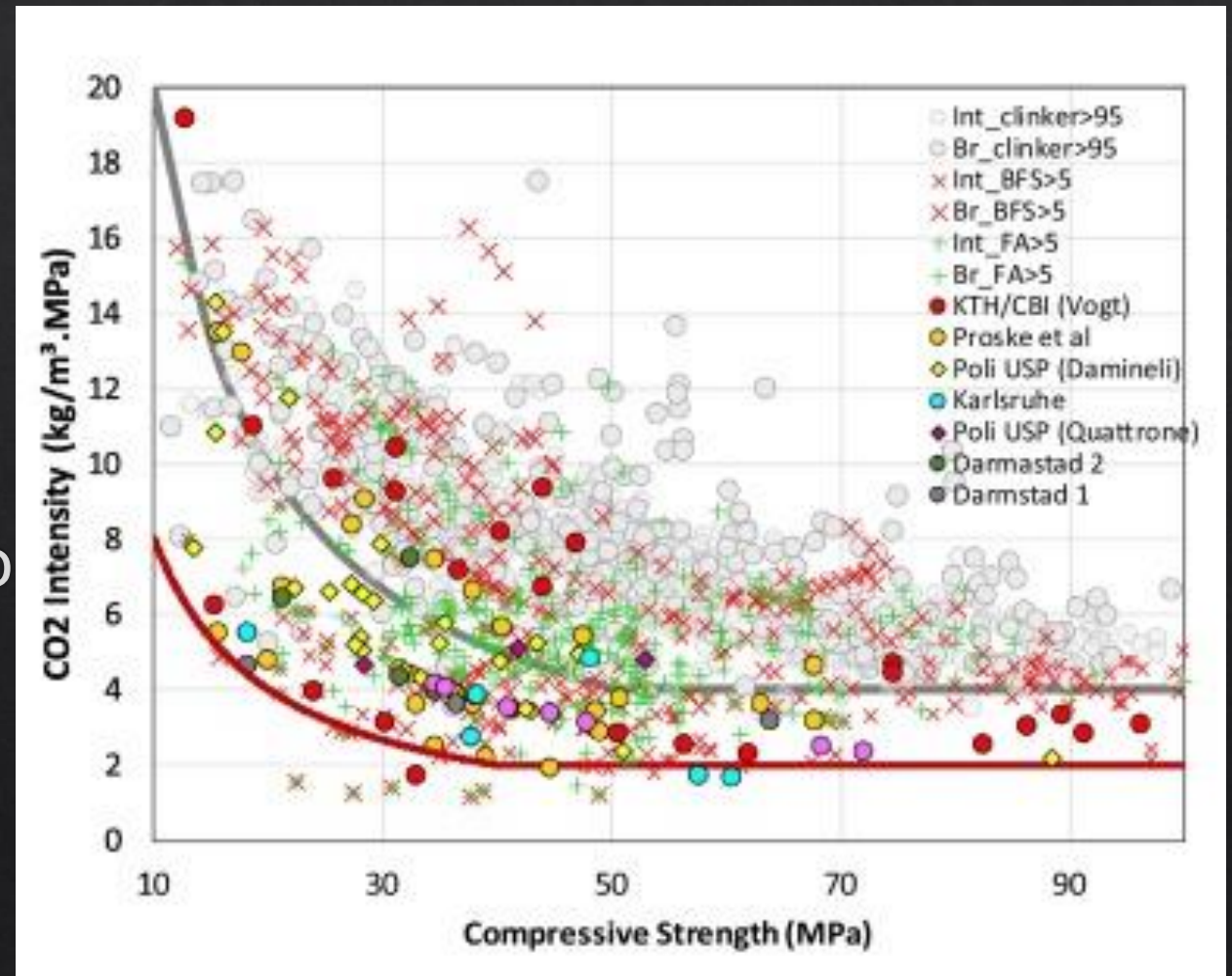
◆ **Características principais:**

- ◆ **baixa relação água/cimento:** portanto há necessidade de aditivos redutores de água (**superplastificantes**).
- ◆ **dimensão máxima do agregado graúdo limitada;**
- ◆ **consumo maior de cimento;**
- ◆ **microestrutura modificada: materiais pozolânicos – microssílica/metacaulim.**

Concretos de alta resistência (“alto desempenho - HPC”)

◇ Vantagens:

- ◇ Aumento de 3,1 vezes no preço e 4,7 na capacidade resistente (redução no volume da estrutura)
- ◇ Maior eficiência ambiental
- ◇ Maior resistência à corrosão da armadura
- ◇ Menor permeabilidade
- ◇ Maior resistência ao desgaste



Concretos de alta resistência (“alto desempenho - HPC”)

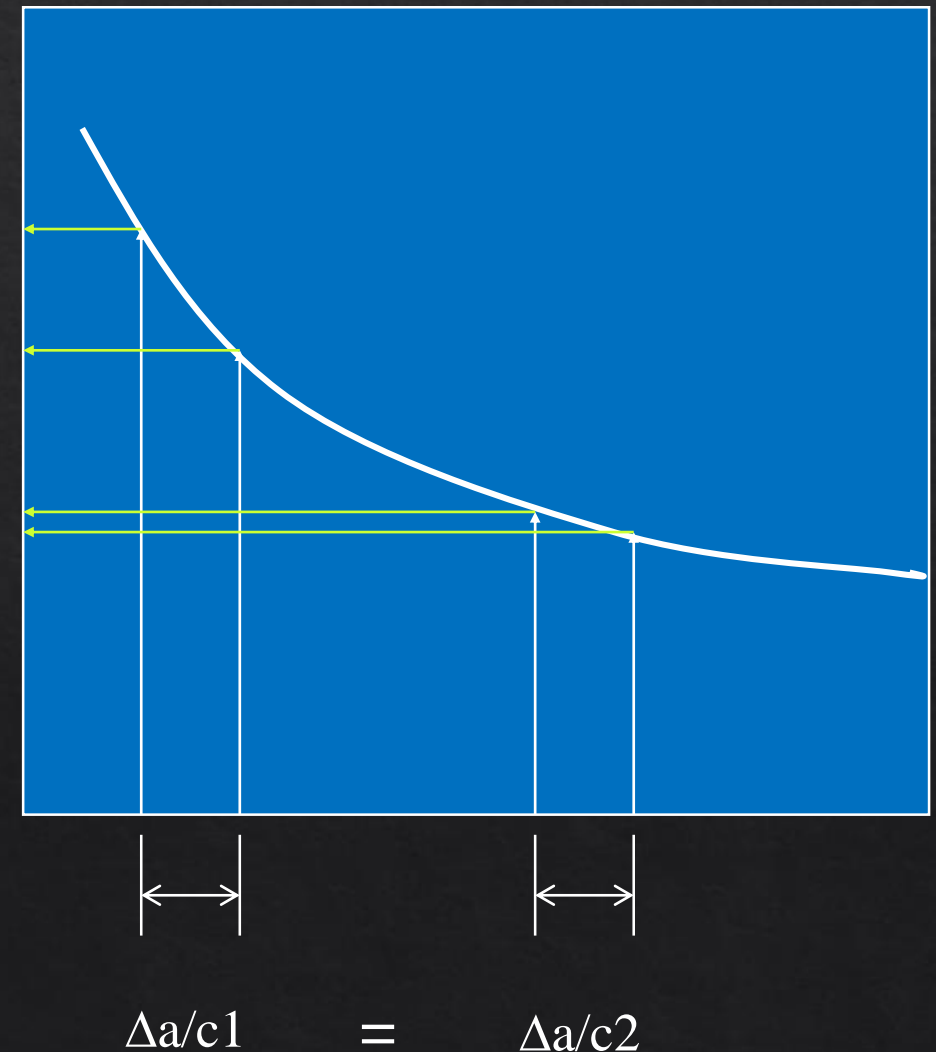
Desvantagens:

- ◇ ruptura mais frágil
- ◇ maior calor de hidratação
- ◇ maior susceptibilidade à ação do fogo
- ◇ Maior risco no controle da produção
- ◇ maiores cuidados no controle de execução

Δf_{c1}

\gg

Δf_{c2}



Concreto auto-adensável

- ◆ Concreto de consistência fluída
- ◆ Tecnologia ligada aos aditivos superplastificantes
- ◆ Objetivo: eliminar a etapa de adensamento/ acabamento.
- ◆ Preenchimento de cavidades:
 - ◆ Bases de máquinas e equipamentos
 - ◆ Espaços de difícil acesso



Adensamento de um concreto de pilar



Concreto auto-adensável

Vantagens:

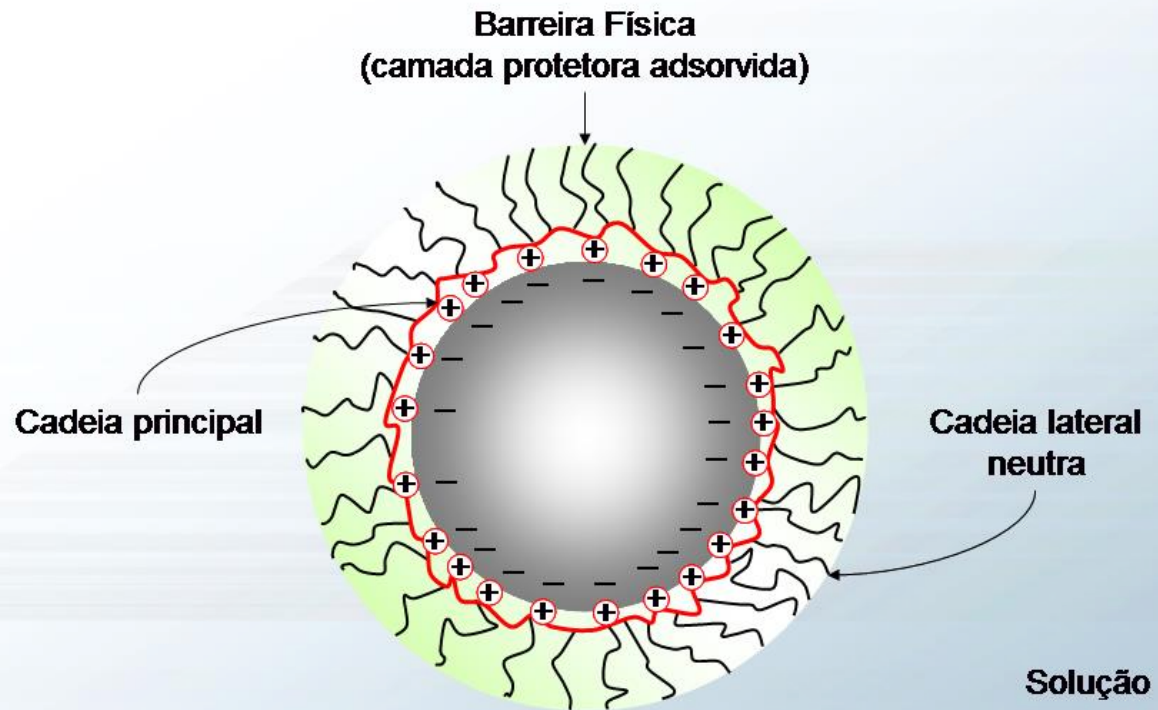
- ◇ Redução ou eliminação da vibração para compactação
- ◇ Redução do ruído
- ◇ Maior aplicabilidade em áreas de grande concentração de armaduras
- ◇ Maior velocidade de execução da estrutura ou pré-moldado (Reduz ciclo de produção, equipamentos, mão-de-obra e manutenção em pré-moldados).
- ◇ Aplicável a uma grande diversidade de sistemas de lançamento (bombeado, por tremonhas, projetado, etc.)
- ◇ Melhor acabamento superficial

Concreto auto-adensável

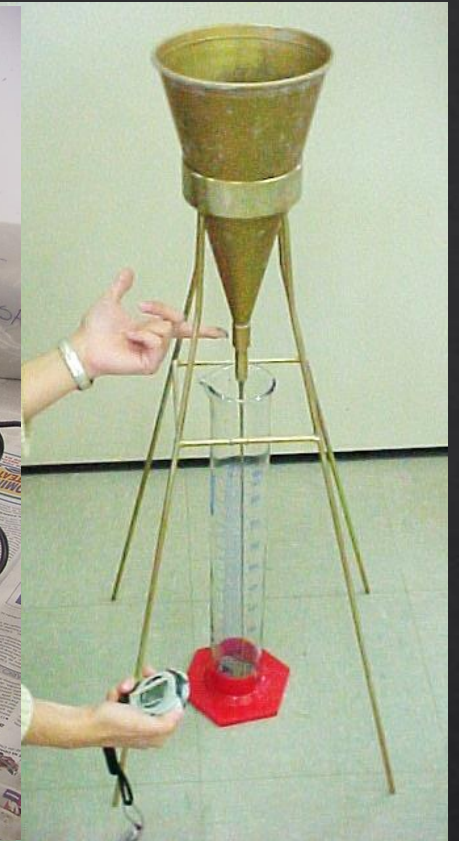
◆ Desvantagens:

- ◆ Maior risco de segregação
- ◆ Maior custo unitário (aditivos e finos são usados em maior quantidade)
- ◆ Maior susceptibilidade aos agentes redutores de abatimento
- ◆ Maior risco de retração e deformação lenta (maior volume de pasta)
- ◆ Maior dificuldade para controle da trabalhabilidade (abatimento é ineficaz: tem que usar espalhamento)

Controle dos asitivos superplastificantes

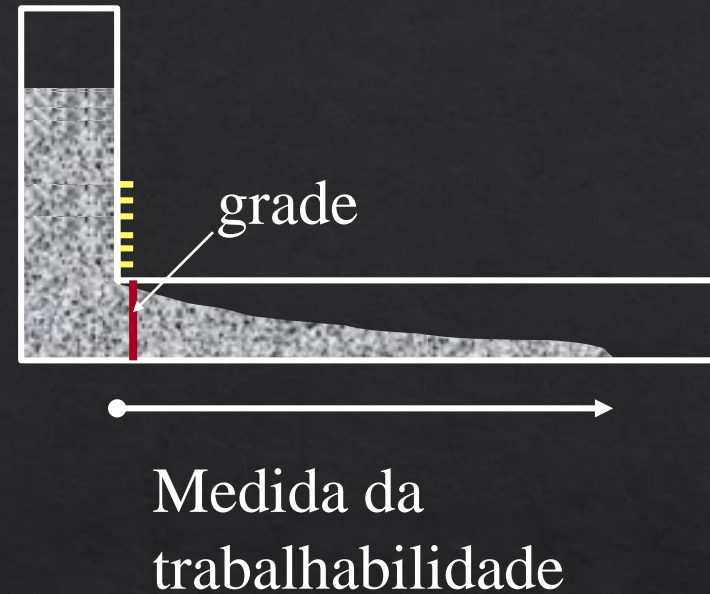


Ex. policarboxilato



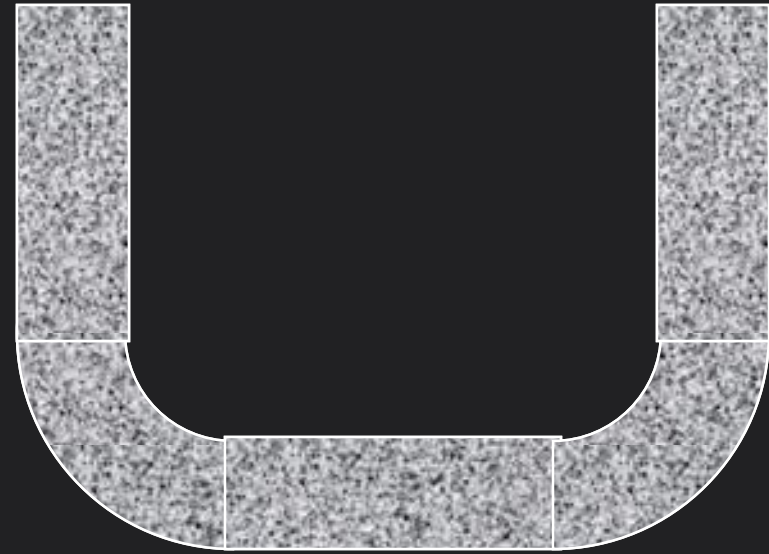
Verificação da trabalhabilidade

- ◆ Abatimento (Slump) não é o mais adequado
- ◆ Existem propostas de medidas de eficiência por ensaio específico
- ◆ Difícil controle de recebimento



Verificação da trabalhabilidade

- ◆ Tubo em “U”
- ◆ Verificação da segregação
- ◆ Análise de viabilidade



Aplicação:
preenchimento de
vazios entre
segmentos e maciço
em túneis

Problema sério:

- O concreto auto adensável é “irrastreável”?



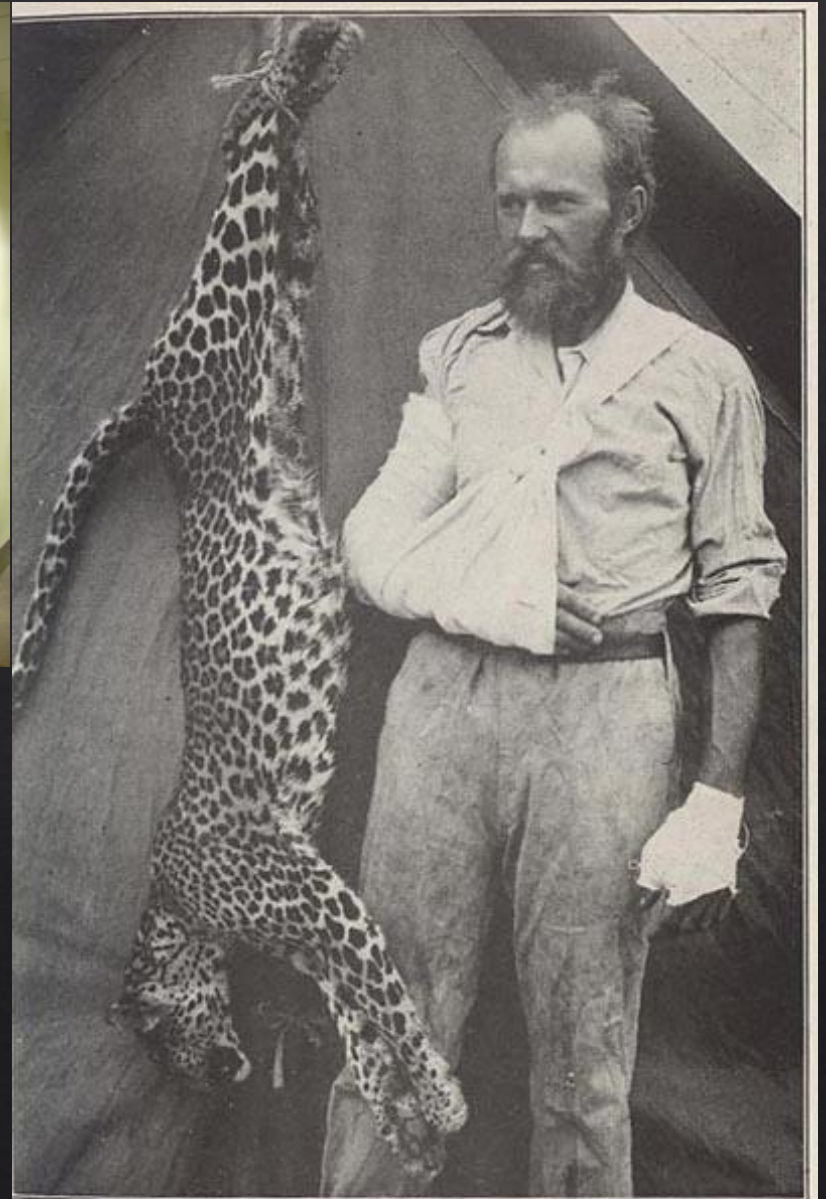


Concreto projetado

◆ **Concreto com dimensão máxima característica do agregado maior ou igual a 9,5mm, transportado através de uma tubulação, projetado sob pressão sobre uma superfície, com compactação simultânea. (NBR 14026).**



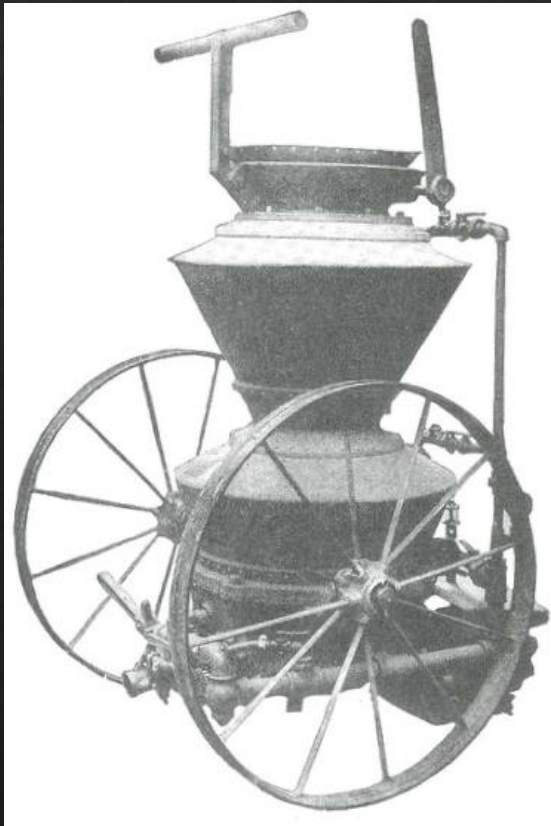
1907 - Invenção por Carl E. Akeley



MR. AKELEY AND THE LEOPARD HE KILLED BARE-HANDED

O início do uso do concreto projetado

- ◆ Em 1907 Akeley aplicou para a recuperação da fachada do Field Columbian Museu em Chicago.



watershapes.com/travelogues/history/beginnings.html

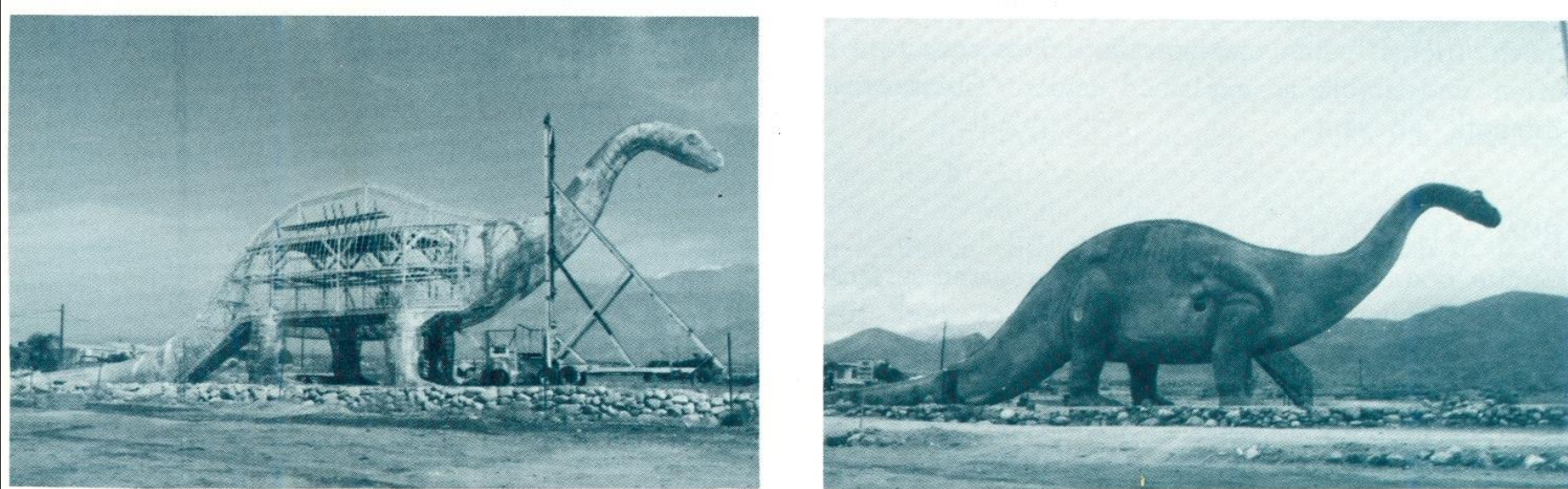
- Aplicações para construção civil já na primeira década do século XX.



"Cement-Gun" por C.A. Akeley, 1910.

www.dr-sauer.com/resources/presentations-lectures/419

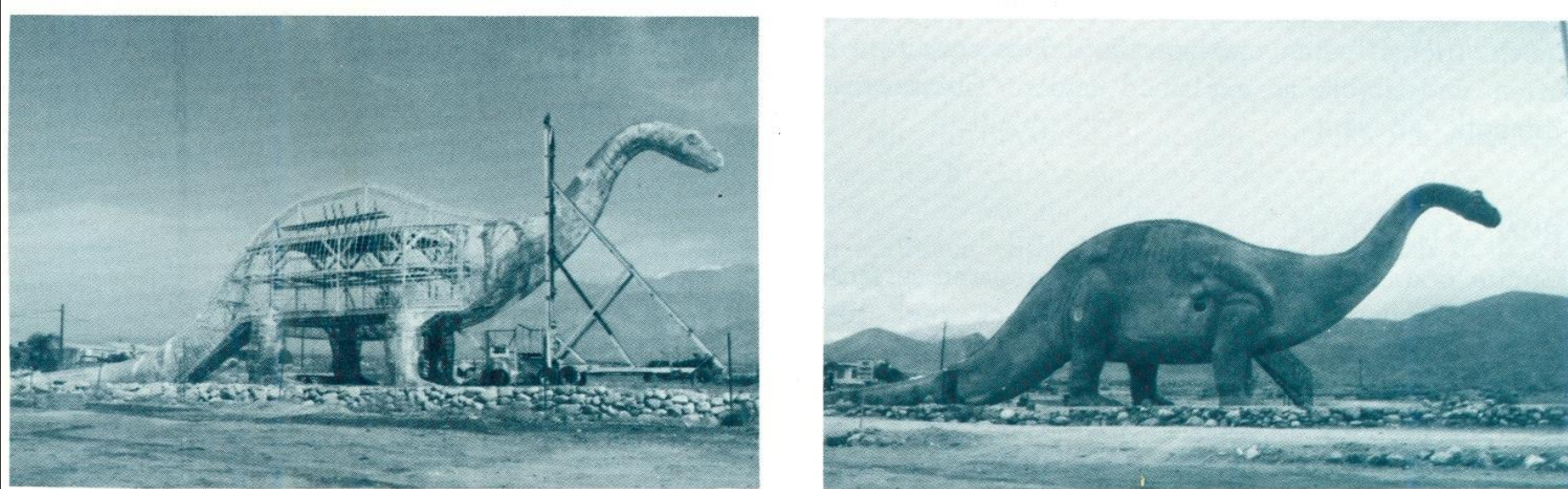
O nascimento do concreto projetado



In order to reproduce lifelike prehistoric animals and giant reptiles such as the one pictured above, the original cement gun was conceived and developed. This is why it all started.

Grande vantagem: dispensar o molde (a fôrma) para a execução da **estátua**.

O nascimento do concreto projetado



In order to reproduce lifelike prehistoric animals and giant reptiles such as the one pictured above, the original cement gun was conceived and developed. This is why it all started.

Grande vantagem: dispensar o molde (a fôrma) para a execução da **estrutura**.



Recuperação de estruturas



Recuperação de estruturas



Novas estruturas



Restaurante do Parque Oceanográfico de Valência



<http://www.muvprojects.com/servicios/estructuras-laminares/>

Túneis

Permite avanço do túnel
sem instalação de
fôrmas



Revestimento primário



Revestimento secundário

Permite executar revestimento
final sem instalação de fôrmas

Principais características

- ◆ Além de dispensas fôrmas:
 - ◆ Agilidade de produção e praticidade
 - ◆ O resultado final depende do processo de produção
 - ◆ Requisitos podem variar bastante dependendo da aplicação
 - ◆ Permite flexibilidade geométrica para a seção do túnel



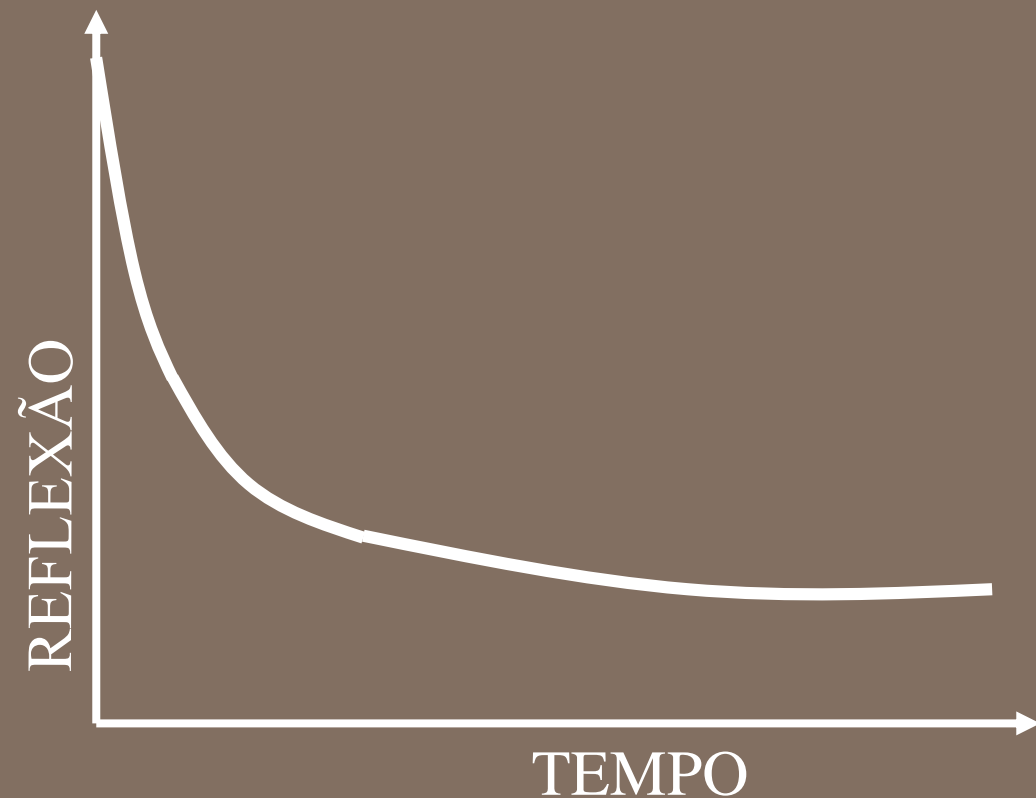
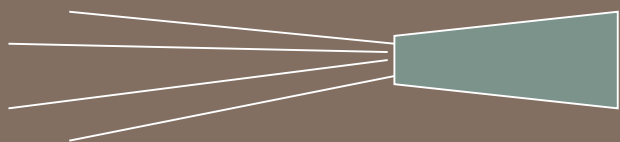
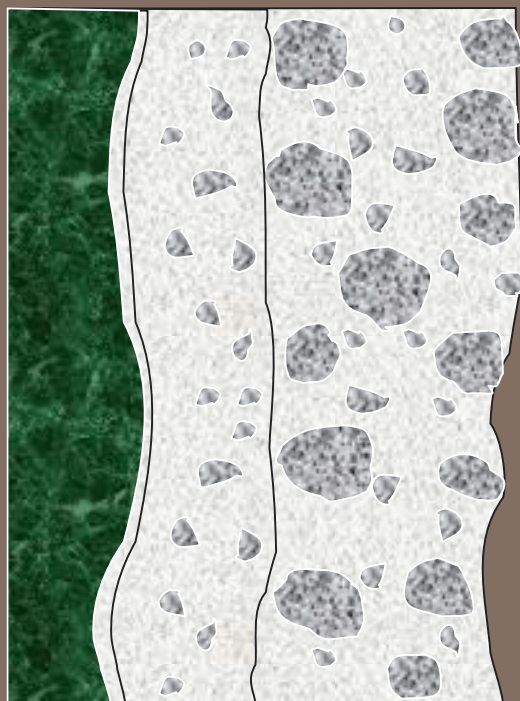
Característica principal: REFLEXÃO

- ◆ Parte do material não fica incorporado na estrutura caindo no solo
- ◆ A reflexão é majoritariamente agregados graúdos e fibras
- ◆ Altera o traço do concreto incorporado na estrutura
- ◆ Influencia as propriedades do material na estrutura

Reflexão do concreto projetado



Reflexão: **fenômeno** que ocorre durante a projeção do concreto, onde parte do material projetado ricocheteia do alvo de projeção.

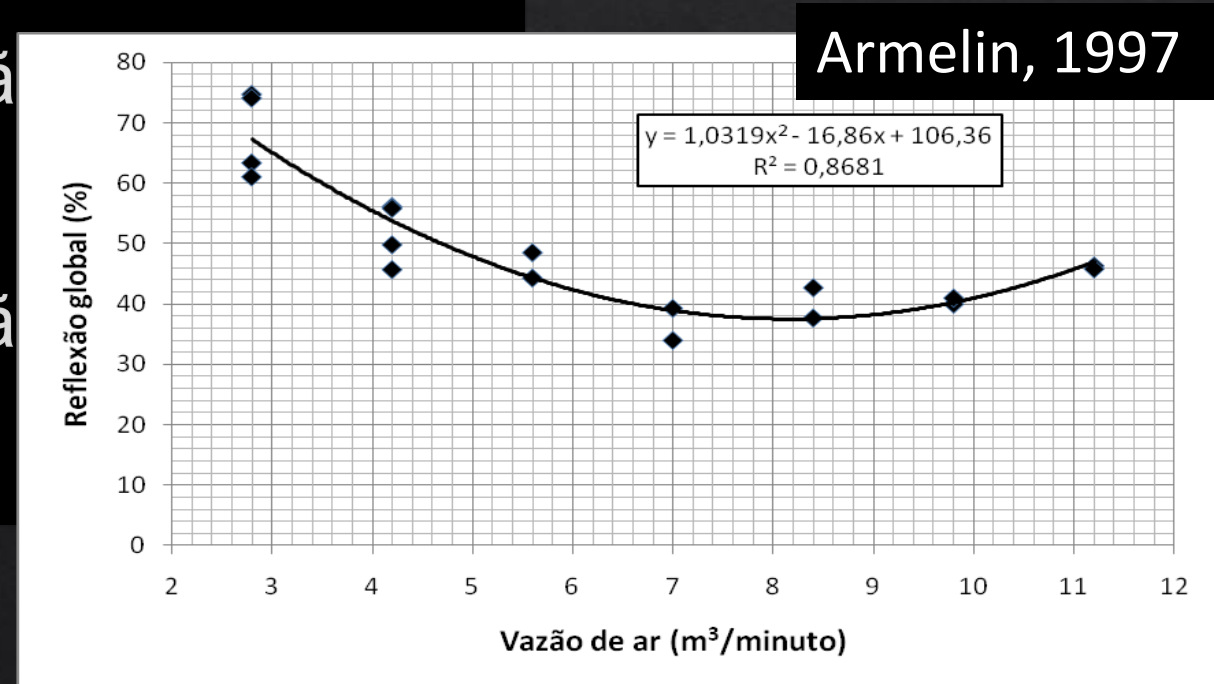


Aspectos que incidem sobre a intensidade da reflexão:

- ◆ Espessura da camada
 - ◆ Quanto maior→menor a reflexão
- ◆ Substrato
 - ◆ Quanto mais irregular e duro→maior a reflexão
- ◆ Umidificação ou processo
 - ◆ Quanto maior→menor a reflexão
- ◆ Velocidade de projeção
 - ◆ Quanto maior→maior a reflexão

Aspectos que incidem sobre a intensidade da reflexão:

- ◇ Distância de projeção
 - ◇ distância ótima ~1m
- ◇ Inclinação do jato
 - ◇ Quanto maior → maior a reflexão
- ◇ Granulometria da mistura
 - ◇ Quanto maior → maior a reflexão
- ◇ Vazão de ar



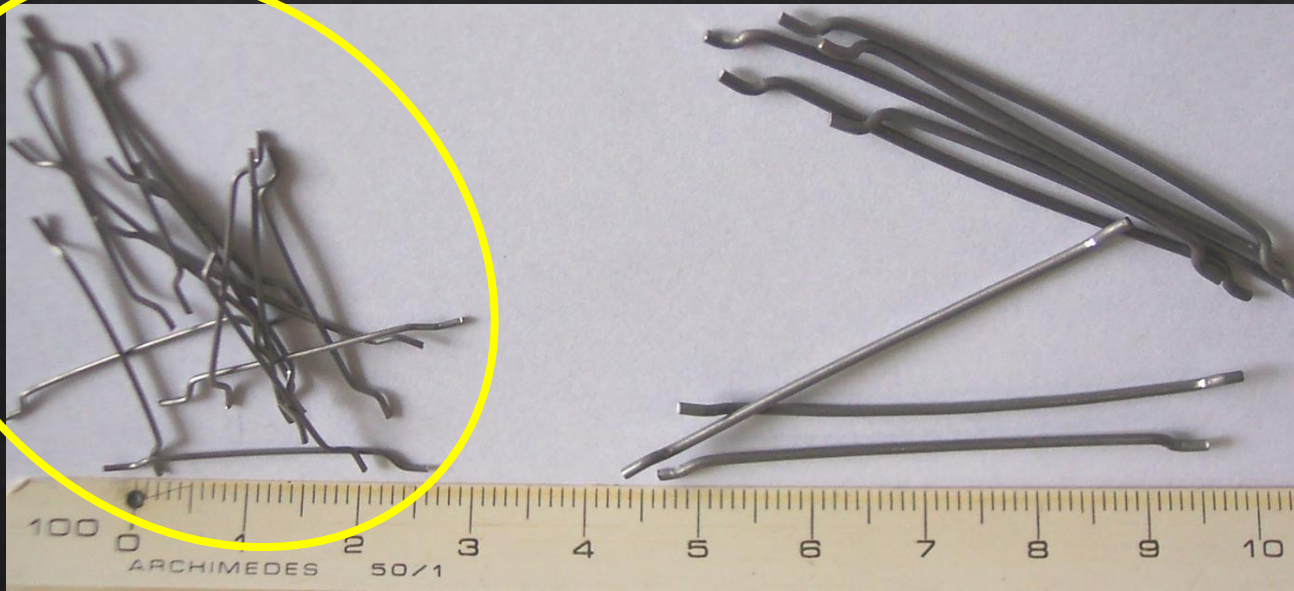
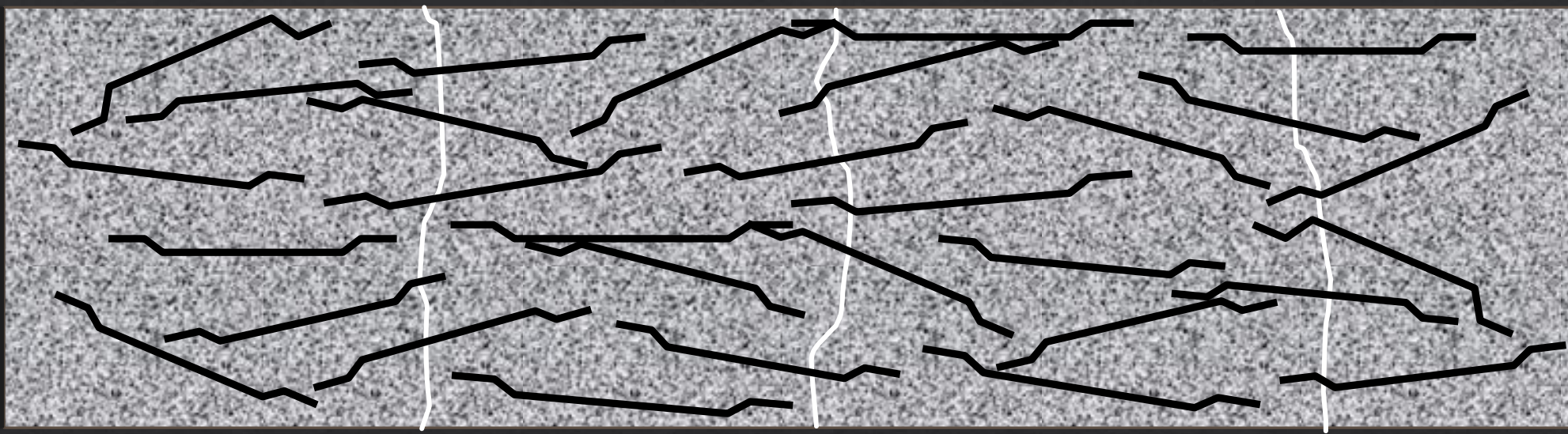
Reflexão e teor de argamassa incorporado

Teor de argamassa inicial (%)	Traço (1:a:b:x)	Teor de argamassa incorporado (%)
40	1:2,02:0,47:0,16	85
	1:1,30:1,32:0,35	73
	1:2,38:0,62:0,26	85
50	1:1,72:0,83:0,25	82
	1:1,65:1,14:0,33	78
	1:2,25:0,75:0,29	81
60	1:2,16:1,10:0,36	81
	1:2,11:1,06:0,32	81
	1:2,23:0,97:0,31	77
70	1:2,44:1,00:0,42	83
	1:2,47:0,68:0,23	87
	1:2,24:1,06:0,36	75
Média e desvio padrão		81±4

Jateamento
das placas



Concreto projetado com fibras

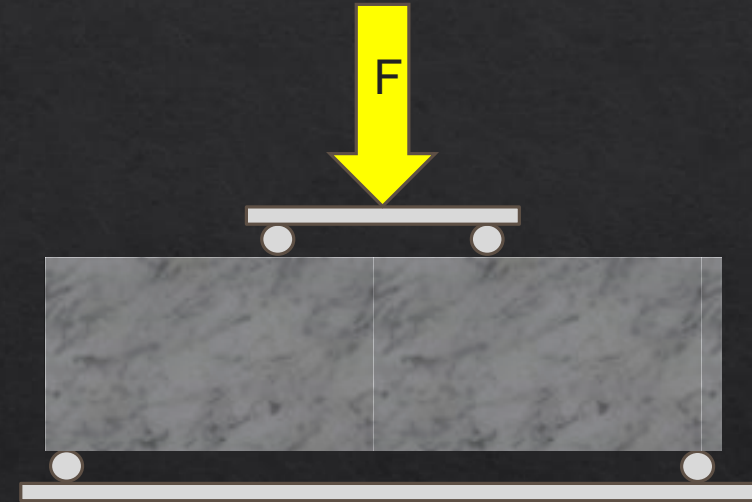
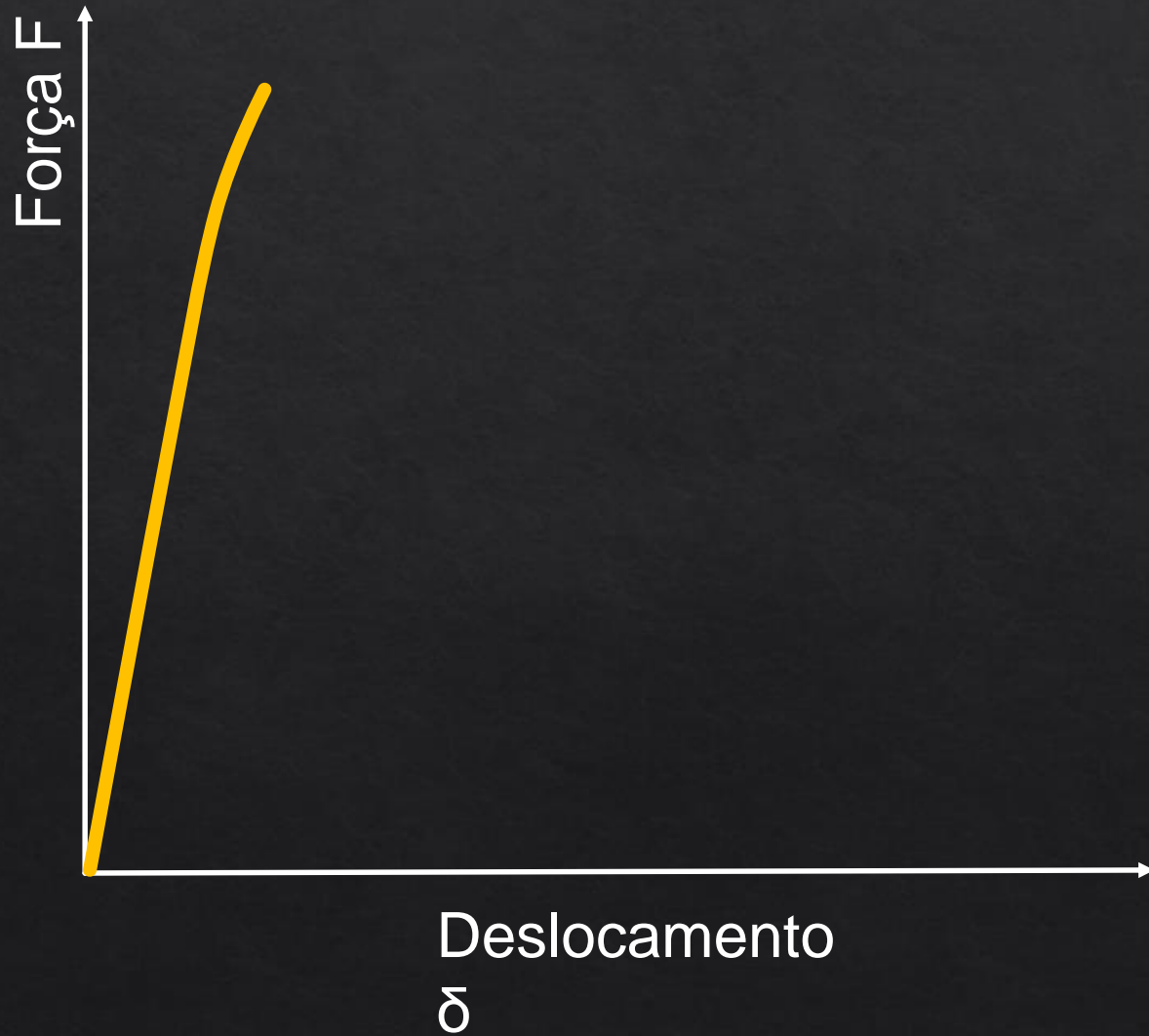


Fibras possuem normalização brasileira:

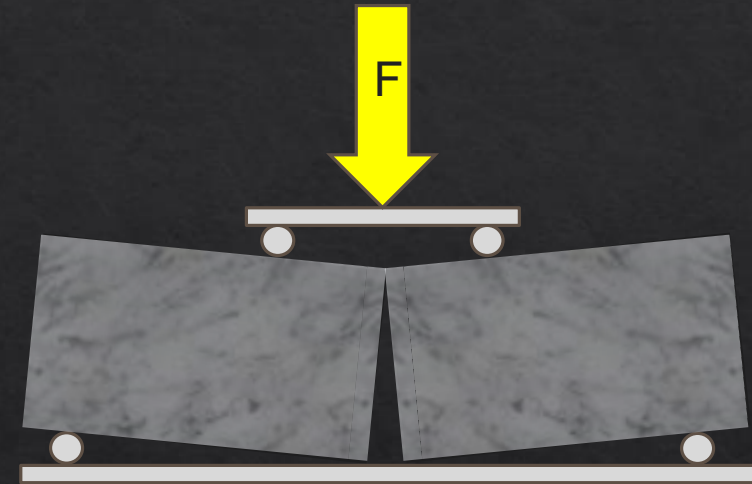
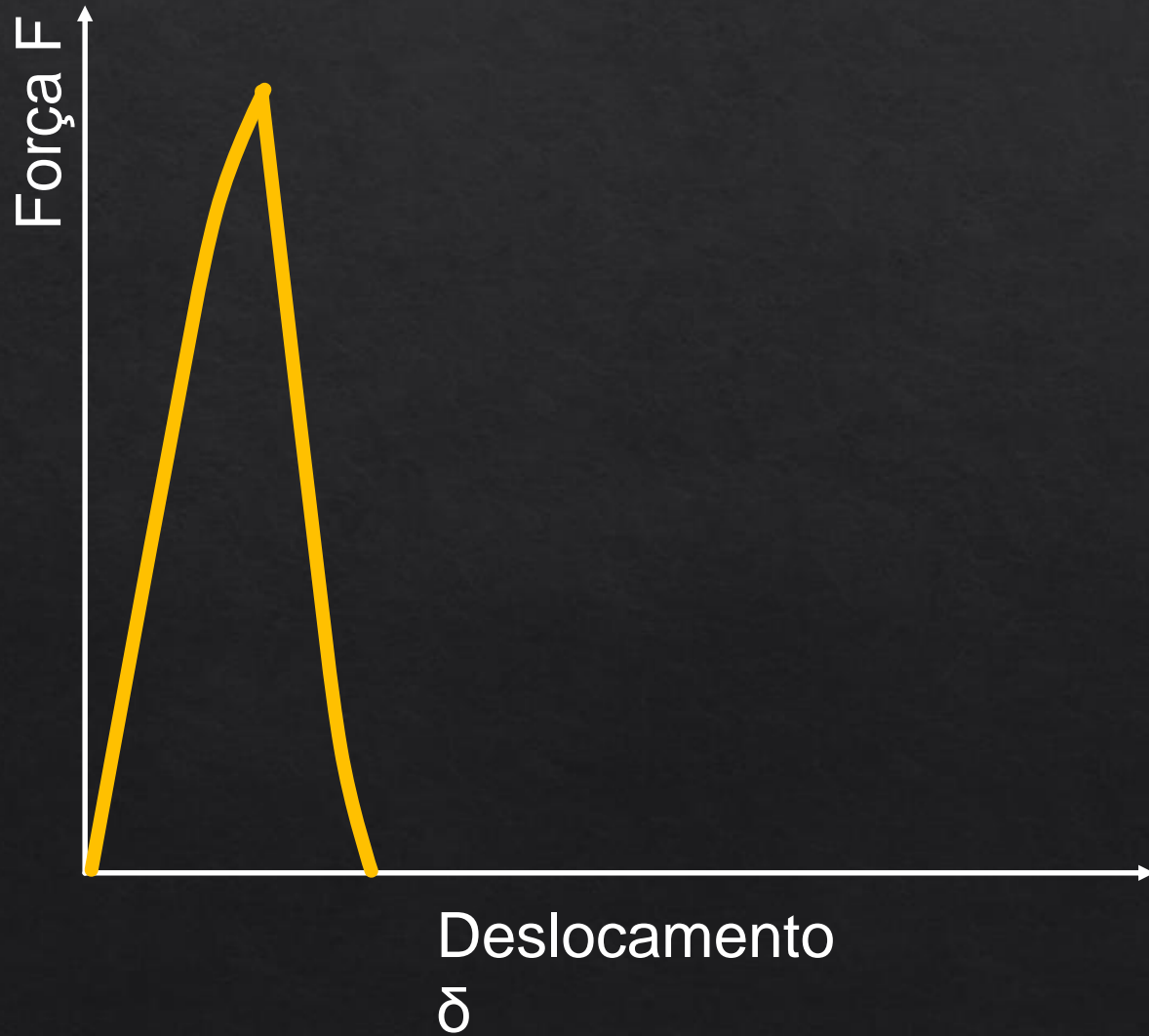
NBR 15530 – Fibras de aço para concreto - Especificação.

NBR 16942 – Fibras poliméricas para concreto – requisitos e métodos de ensaio

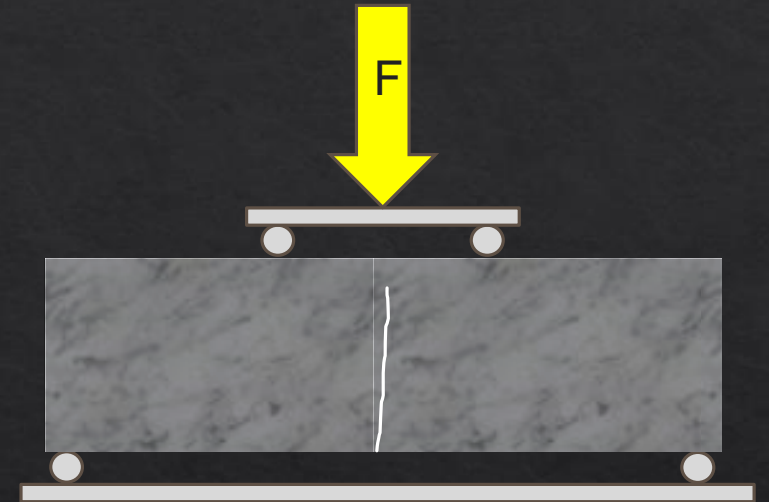
Concreto simples **não** possui resistência residual pós-fissuração



Concreto simples **não** possui resistência residual pós-fissuração

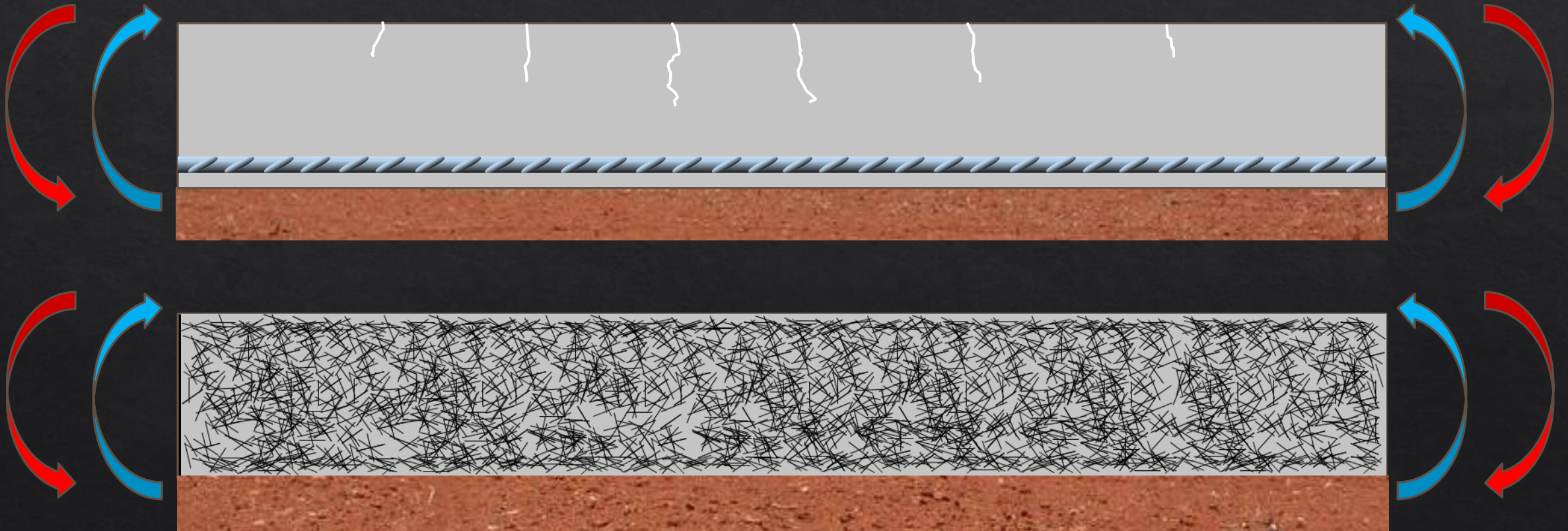


Concreto com fibras possui resistência residual p s-fissura o

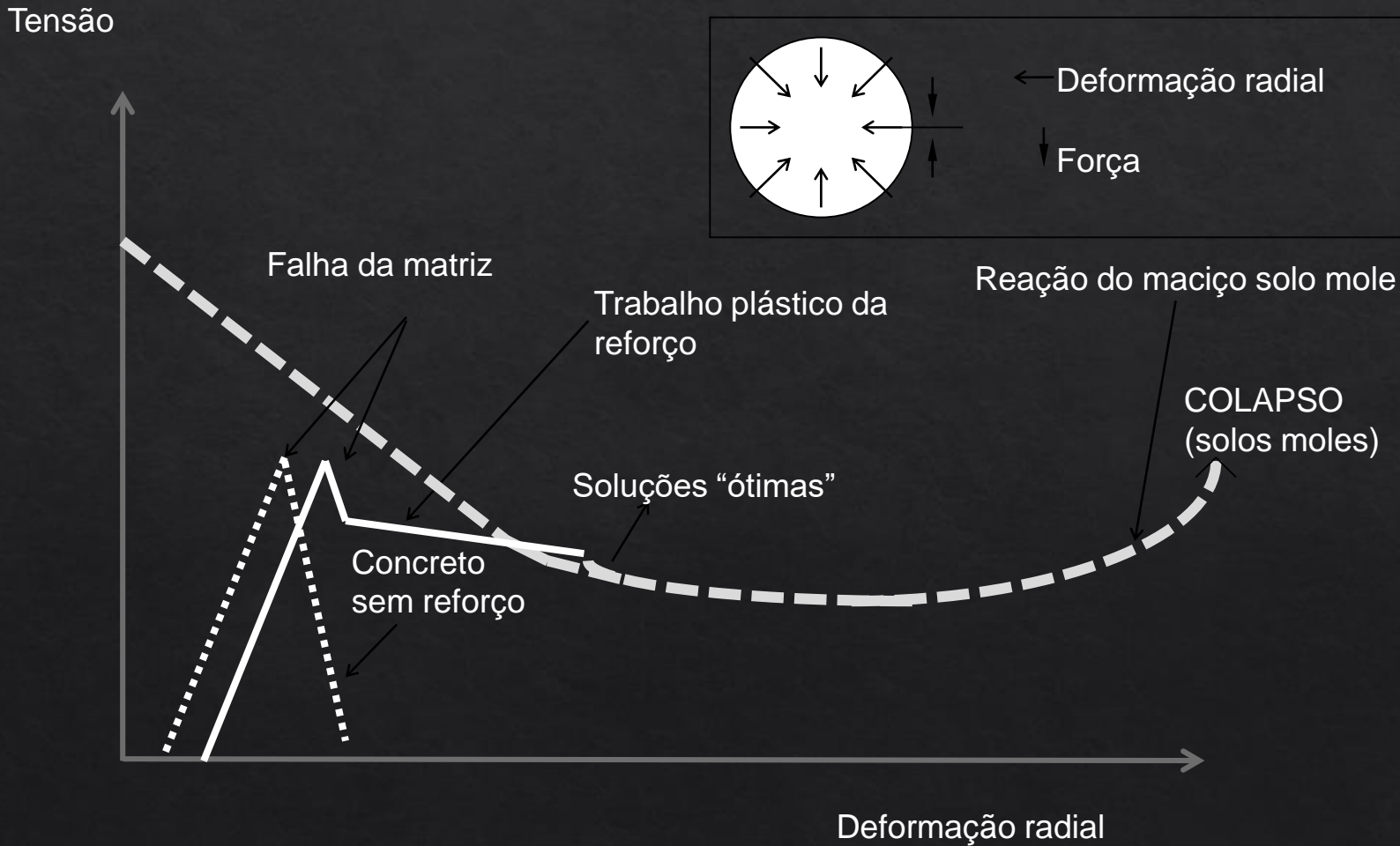


Por que do CRF?

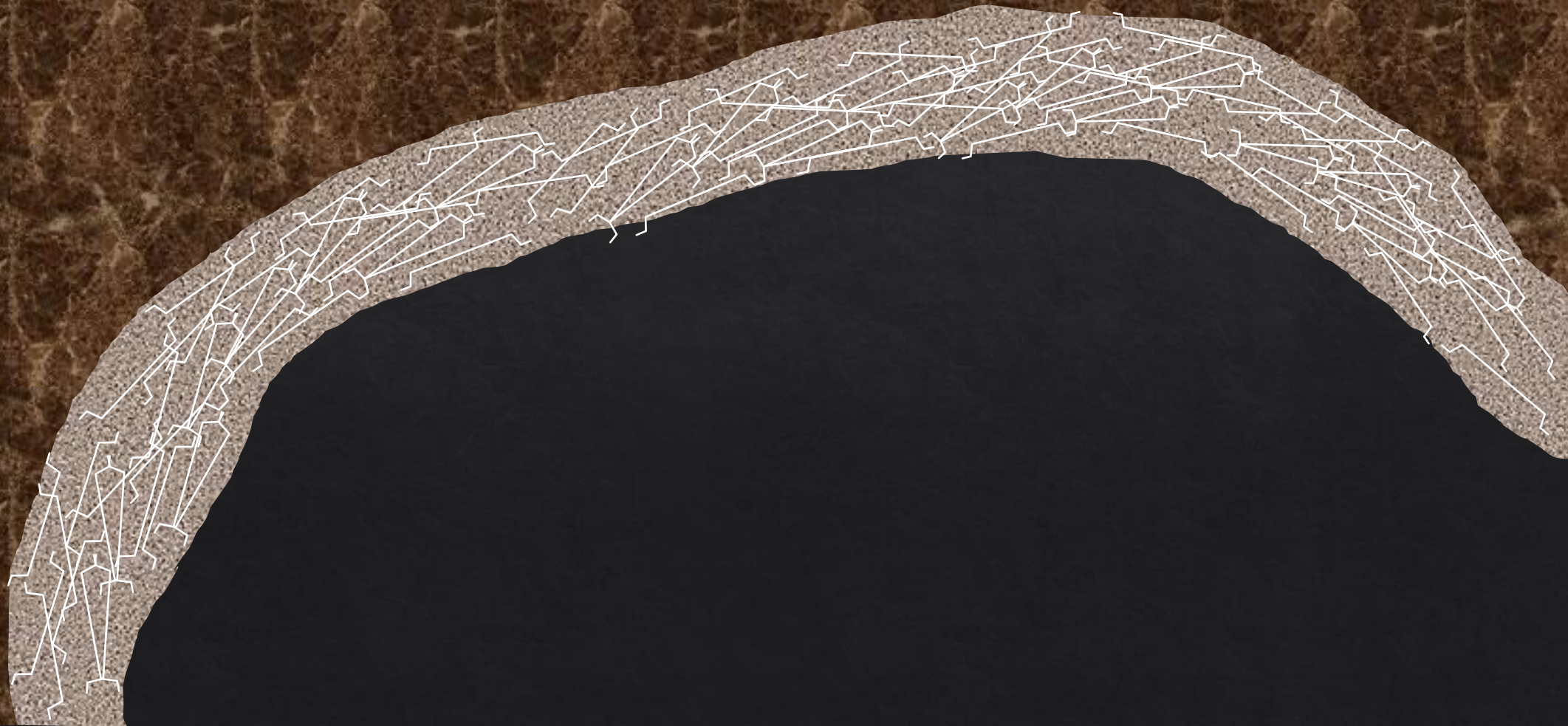
- ◆ Reforça todo o volume do concreto.



Modelo (NATM)



Rocha fraturada



Rocha fraturada



Cisalhamento
passa a ser
crítico

Efeito do uso das fibras

Trabalhabilidade :

- ✓ Dificultam mobilidade da mistura
- ✓ Aumentam desgaste do equipamento
- ✓ Diminuem risco de deslocamento

Concreto pseudo-dútil:

- Capacidade resistente pós-fissuração
- Múltipla fissuração

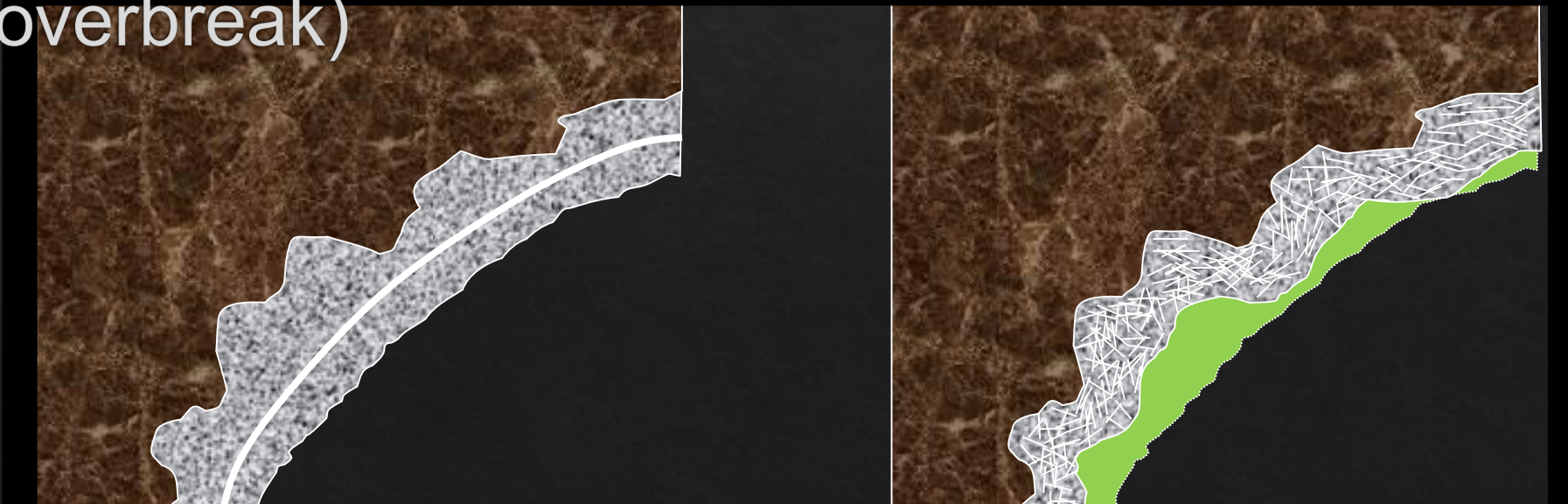
Vantagens do CPRF em túneis

- O CPRFA pode ser aplicado imediatamente após a escavação (ductilização da estrutura durante a execução)
- Evita o uso de tela metálica.



Concreto projetado com fibras para túneis em rocha

- ◆ O corte da frente de escavação por fogo gera superfície de grande irregularidade (overbreak)



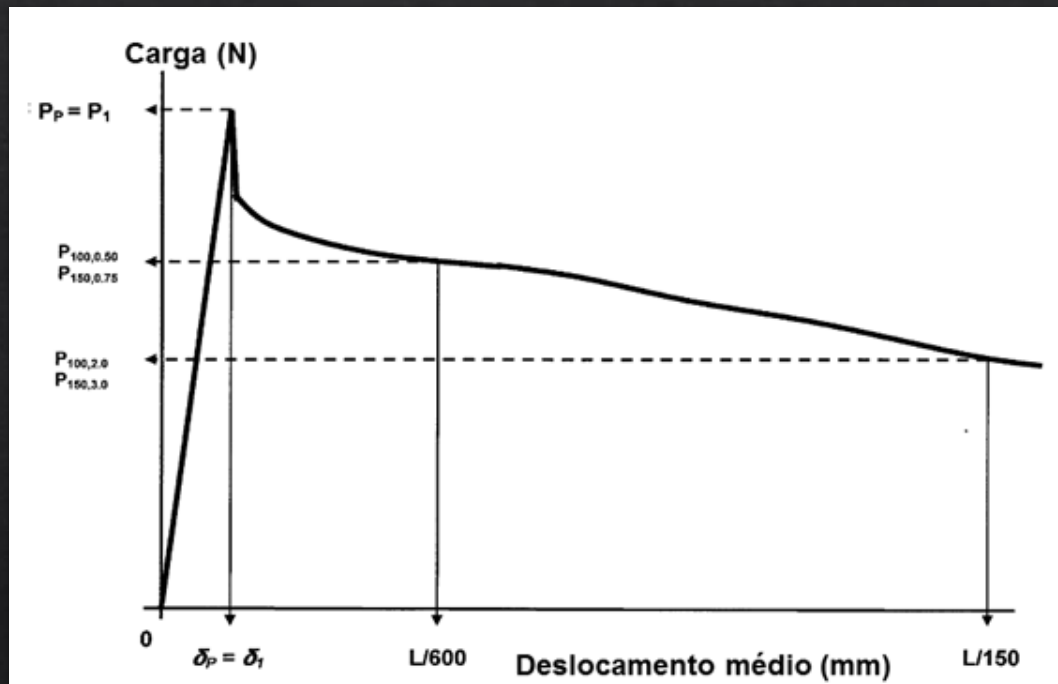
Análise do uso potencial do CRFA com agregados reciclados para pavimentos

- ◆ A indústria da construção civil deve consumir muito resíduo: minimiza deposições em aterros e consumo de material virgem.
- ◆ Um problema típico é a redução da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto com o uso de resíduos por aumentar a porosidade do material.
- ◆ Seria possível contornar esse “problema”?

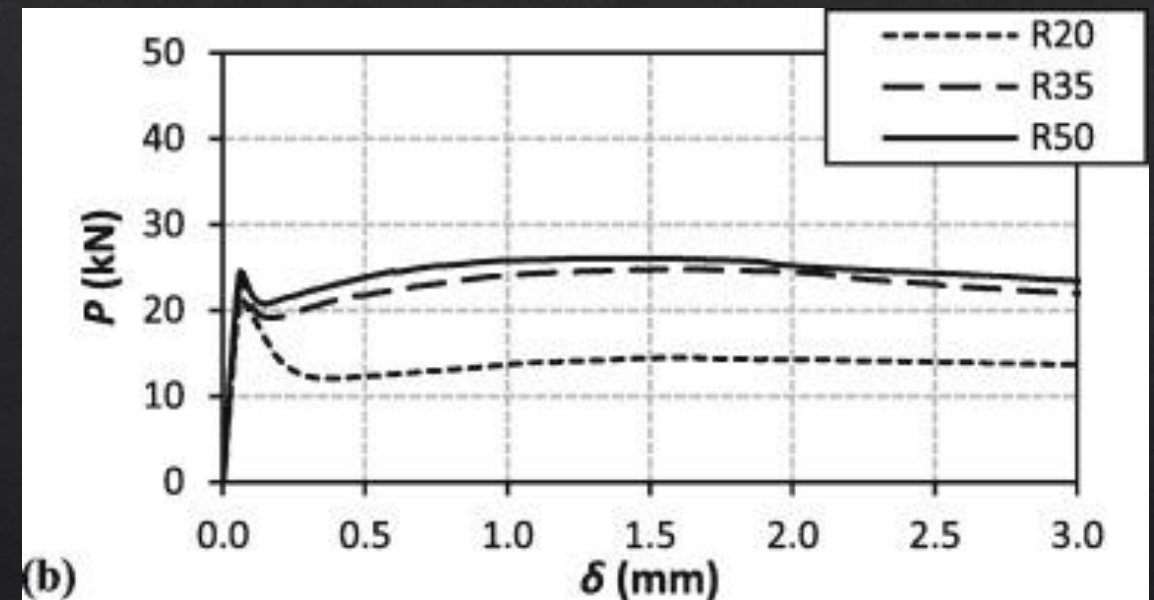
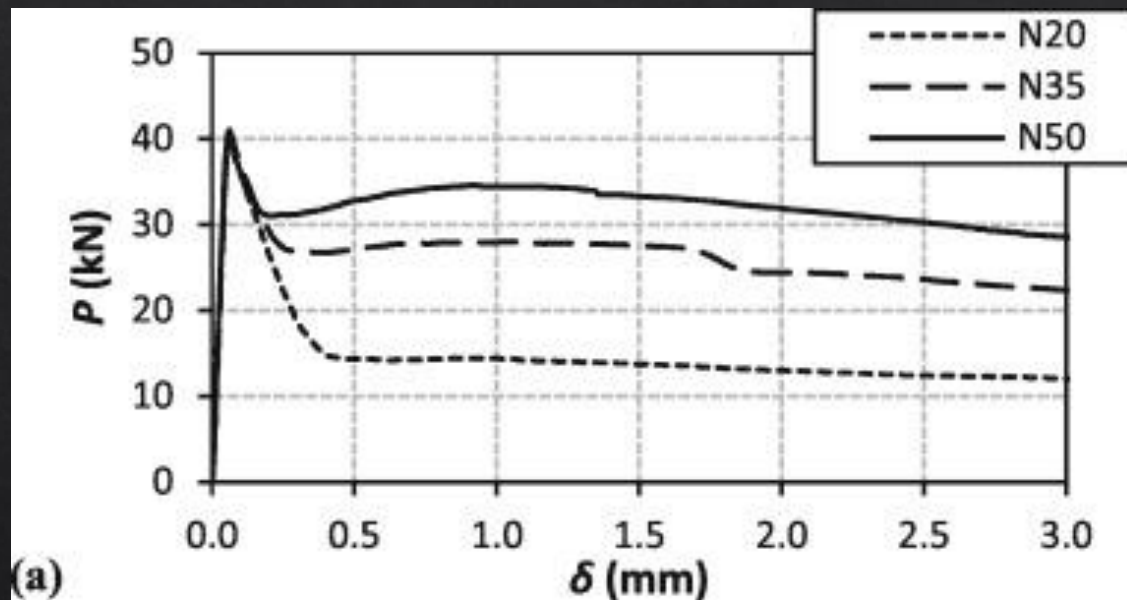
Introdução

- ◆ 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

Dimensionamento baseado na resistência residual (ASTM C1609)



Dimensionamento baseado na resistência residual (ASTM C1609)

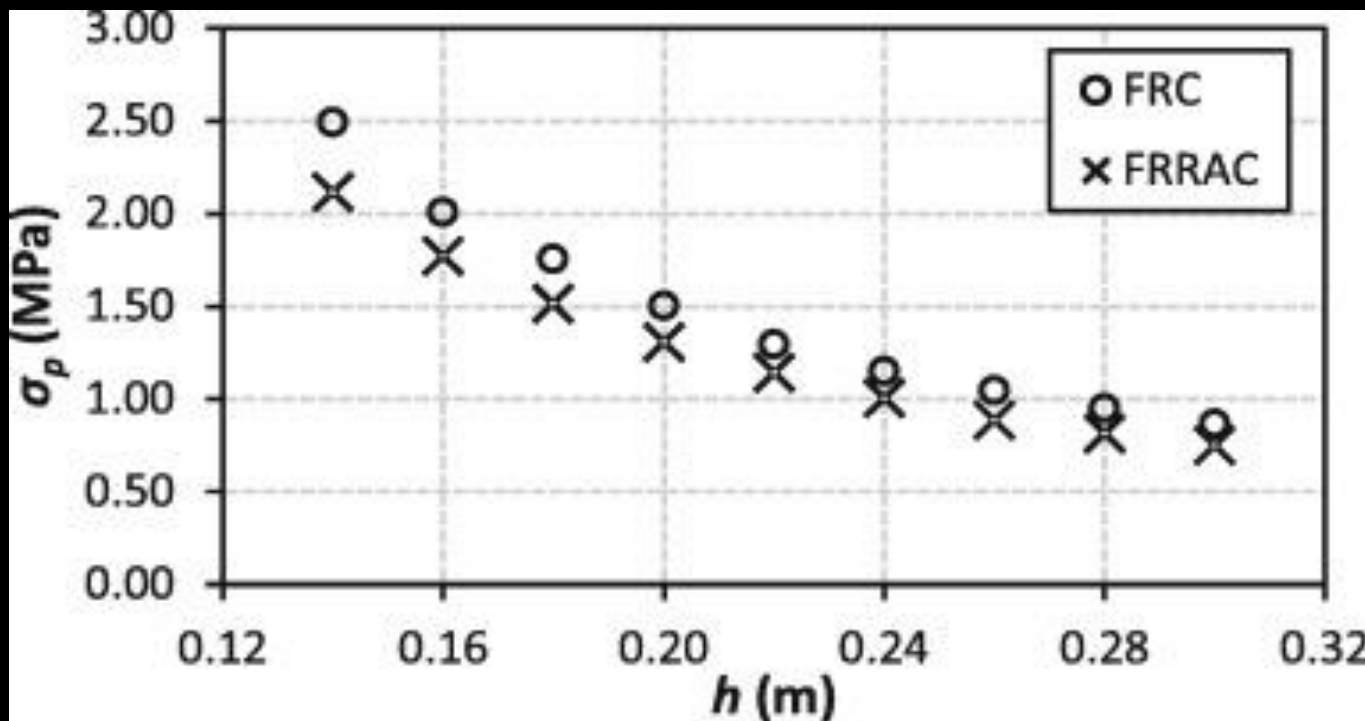
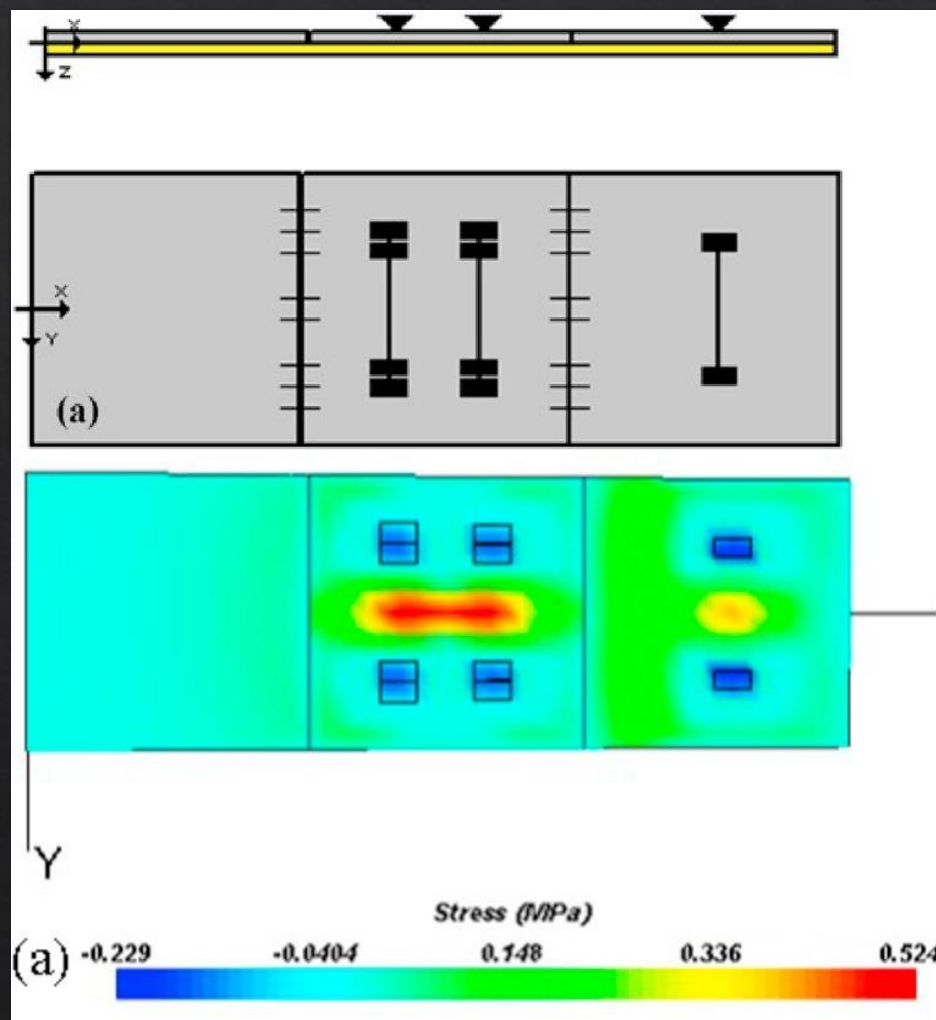


P - δ curves for (a) FRC and (b) FRRAC.

Resultados e discussões

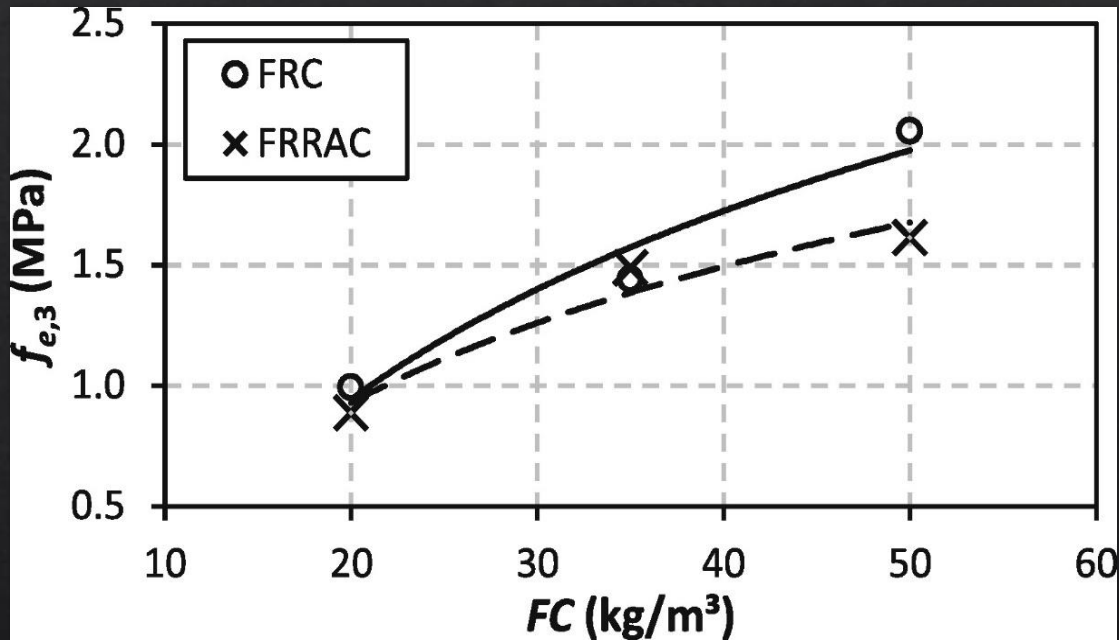
Concrete mixes	f_P (MPa)	$f_{0.75}$ (MPa)	$f_{3.0}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)	E_{cm} (GPa)
N20	5,2 (7.5%)	1,9 (15.7%)	1,6 (14.2%)	46.9 (1.8%)	35.8 (3.6%)
N35	5,4 (9.4%)	2,9 (21.3%)	2,5 (22.3%)	46.5 (1.2%)	37.4 (2.4%)
N50	5,3 (8.2%)	4,4 (6.8%)	3,7 (6.7%)	49.5 (2.6%)	39.2 (3.9%)
R20	2,8 (6.8%)	1,7 (12.6%)	1,7 (13.1%)	18.5 (0.1%)	19.1 (1.9%)
R35	3,1 (7.0%)	3,0 (16.5%)	2,9 (21.5%)	23.2 (4.8%)	20.5 (3.7%)
R50	3,3 (3.2%)	3,3 (11.5%)	3,1 (16.1%)	23.9 (2.2%)	22.1 (7.4%)

Estudo de caso de pavimento EverFE (versão 2.23) da Universidade do Maine

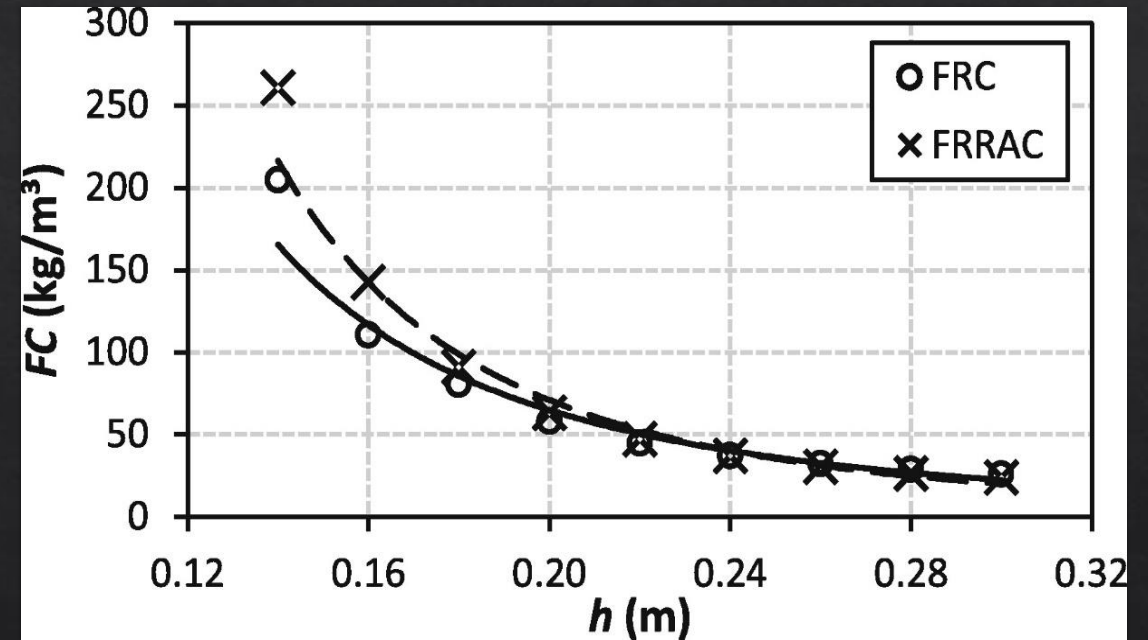


Maximum principal stresses on (a) the top and (b) the bottom of a three slabs system.

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.

Conclusões do trabalho

- ◆ O estudo de caso mostrou que pavimentos com espessura superior a 0,22 m requerem conteúdo de fibra e cimento semelhantes para as lajes produzidas com FRC e FRRAC.
- ◆ Estudos futuros abordando 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

Pré-fabricados de concreto: caso específico dos tubos de concreto

A otimização do sistema de reforço

Principais Aplicações



Águas
pluviais



Esgoto Sanitário



Drenagem

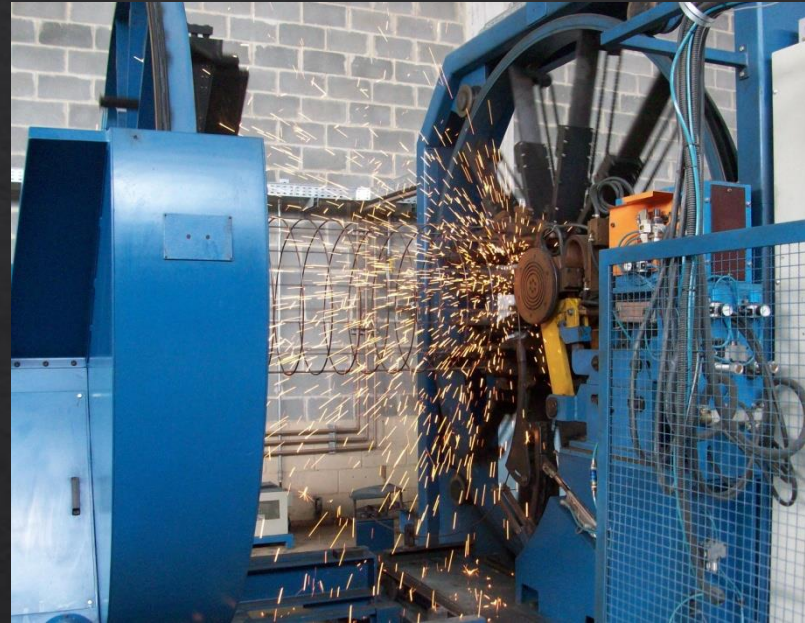


Galerias e Bueiros



Pipe
jacking

Produção de tubos: armadura



Produção de tubos: moldagem

Alimentação com
vibração simultânea



Acabamento
de topo com
prensagem



Produção de tubos:
Desfôrma
estocagem

cura



NBR 8890 - Tubo de concreto, de seção circular, para águas pluviais e esgotos sanitários – Evolução de 2007 a 2018

- ◆ Tubos são componentes pré-moldados de concreto, controlados como produto acabado.
- ◆ O uso de fibras como reforço para tubos de esgoto e águas pluviais começou em 2007.
- ◆ Possibilidade de incorporação dessa nova forma de reforço baseada em estudos prévios.

CHAMA NETO, P. J. **Avaliação de desempenho de tubos de concreto reforçados com fibras de aço.** São Paulo: USP, 2002. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2002.

RAMOS, M.F. **Análise experimental de tubos de concreto reforçado com fibras de aço.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas UNICAMP. Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, SP. 2004.

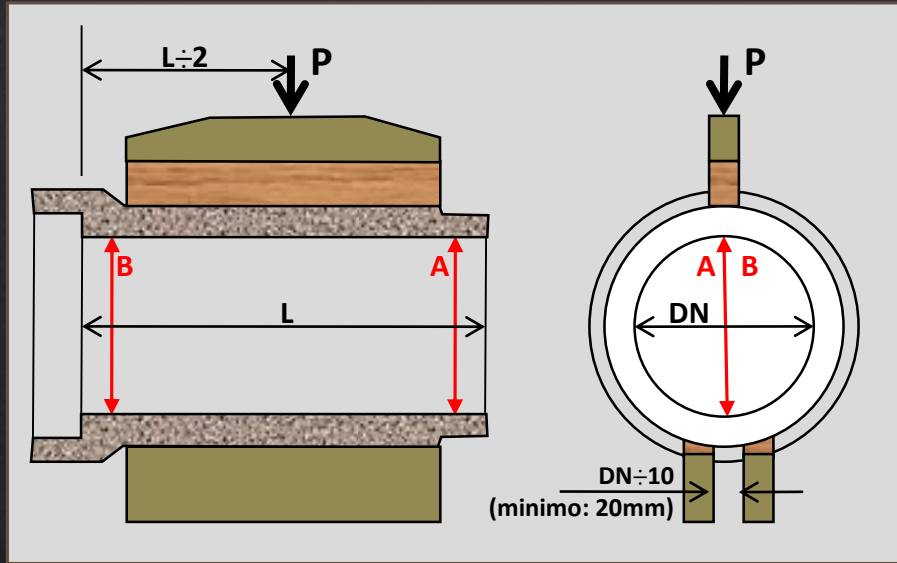
NBR 8890 - Tubo de concreto, de seção circular, para águas pluviais e esgotos sanitários – Evolução de 2007 a 2018

- ◆ Postura conservadora
 - ◆ diâmetro máximo de 1 m e
 - ◆ maior nível de exigência para o CRF durante o ensaio de compressão diametral
- ◆ Em 2018
 - ◆ Igualaram-se as exigências para o CRF e convencional durante o **ensaio de compressão diametral**



Ensaio de compressão diametral NBR 8890:2018

Controle de força



- ✓ Carregamento em dois estágios para tubos de concreto simples e armados
- ✓ Carregamento cíclico para TCRF
- ✓ Requisitos
 - ✓ Força mínima isenta de dano
 - ✓ Força de ruptura ou máxima (TCRF)



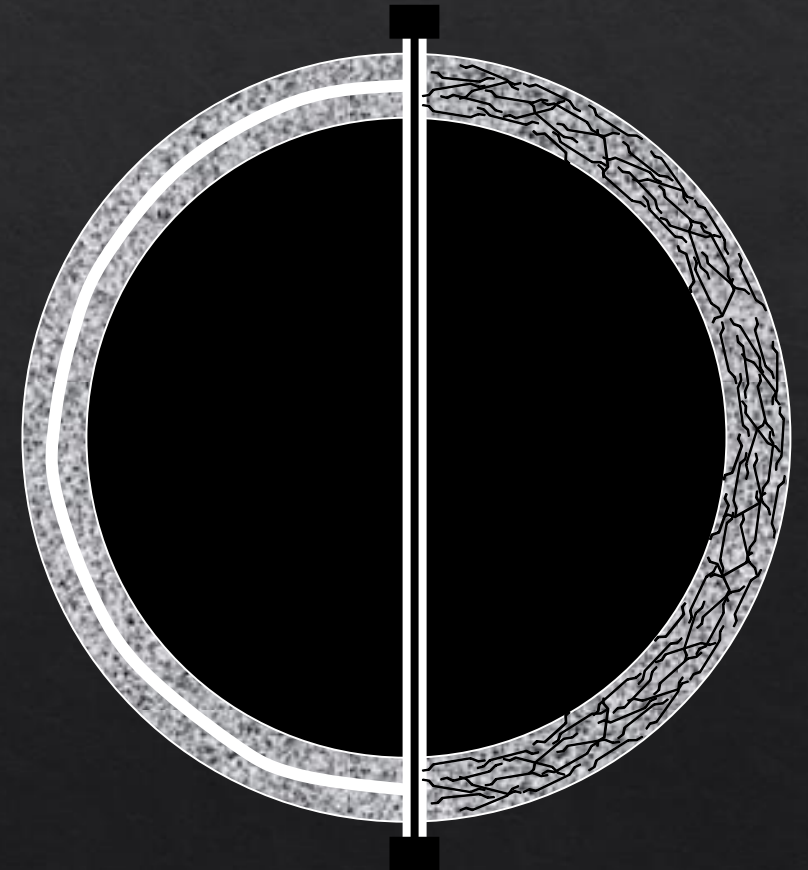
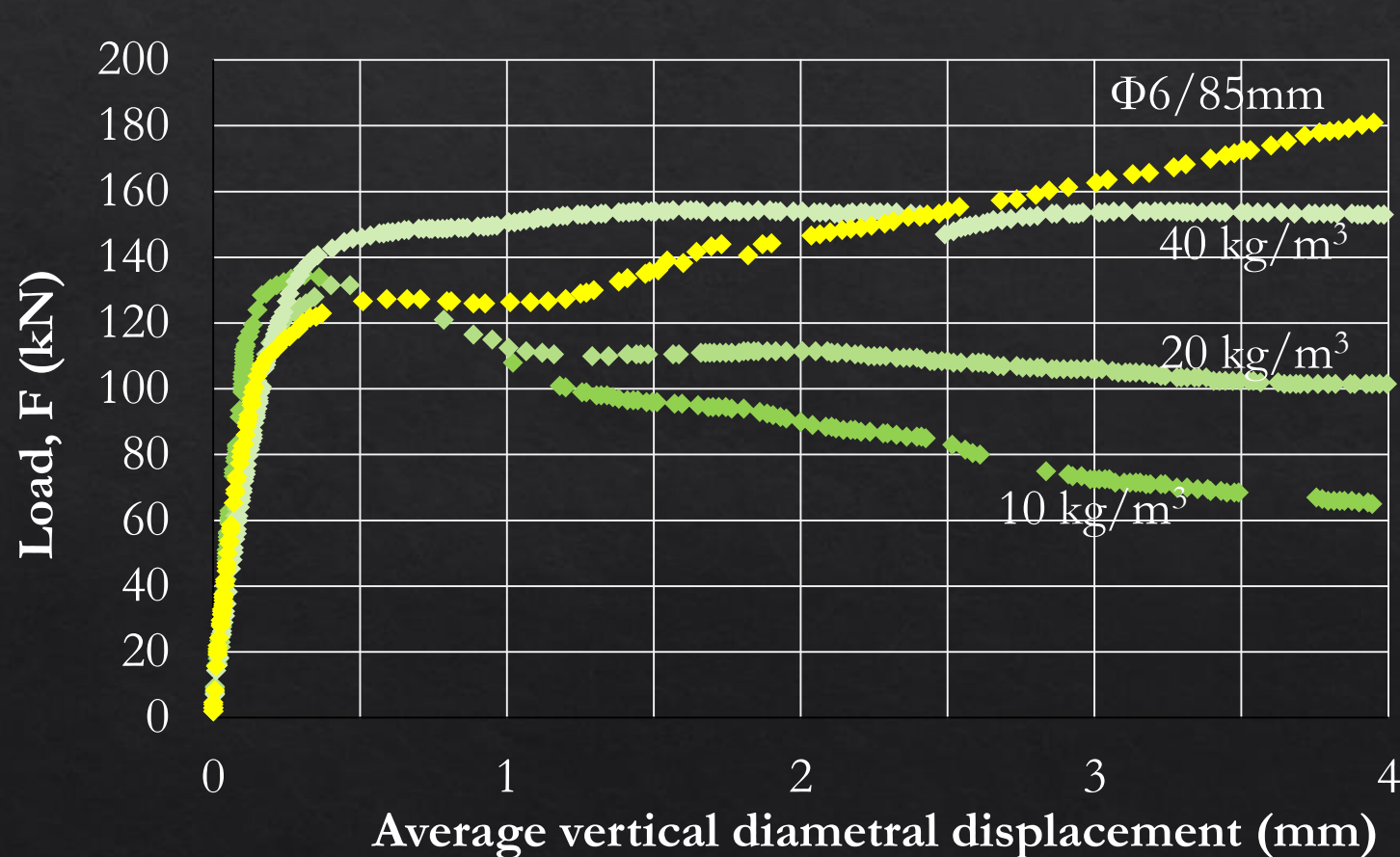
Proposta de novo sistema de avaliação: Ensaio de compressão diametral

- ◇ Controle simultâneo de cargas e deslocamentos diametrais
- ◇ Parametrização mais precisa do comportamento durante o ensaio de compressão diametral



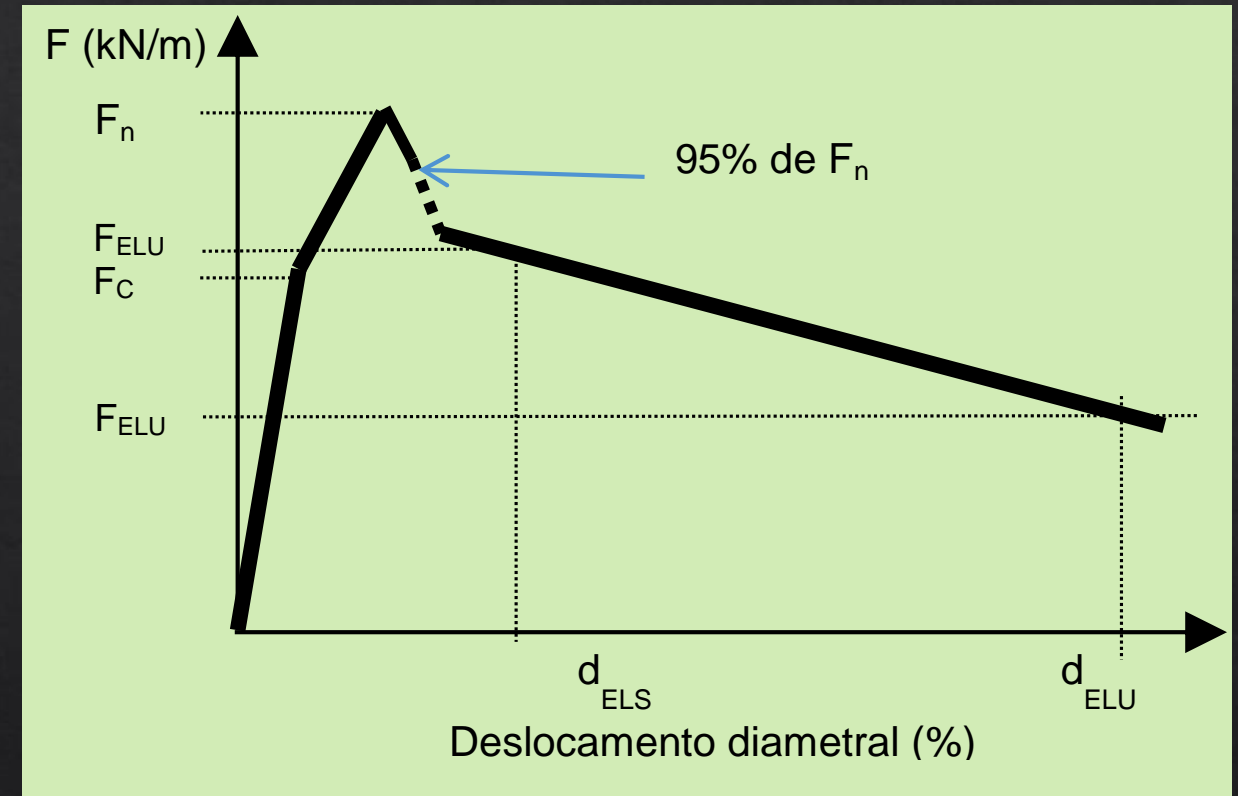
Ensaio de compressão diametral TCRF

- ✓ Comparação de desempenho do reforço de fibras e convencional



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 o problemade não controlar resistência vinculada ao nível de fissuração/deslocamento (ELS e ELU)



Ainda vamos
modelar através de
modelos
numéricos com
representação
discreta e explícita
das fibras



Concreto transmitindo luz!?

