

CONCRETO

estabilidade dimensional

PCC 3222
2023

Revisão (durabilidade)



<https://forms.gle/y1FxiJfV2JErgWRW9>

Objetivos da aula

- Entender os fenômenos de retração e fluência do concreto e os riscos de fissuração a ela associados
 - Conhecer os parâmetros do concreto que influenciam

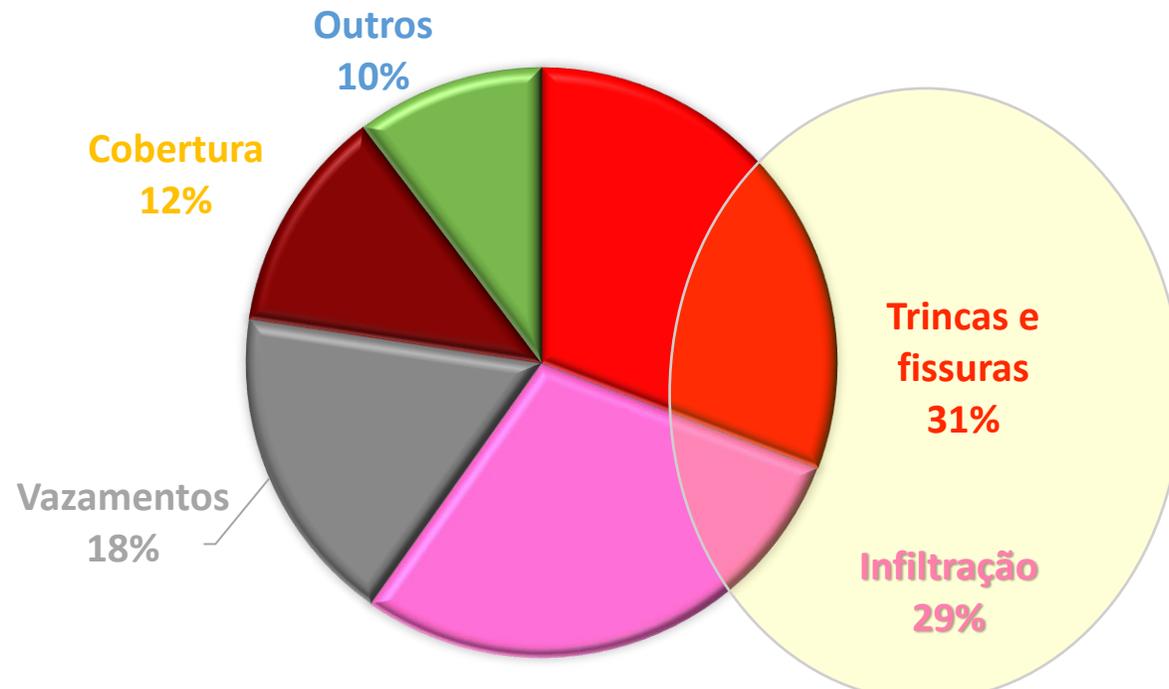
Fissuras tem consequências

veja

Economia

Quase metade dos imóveis do Minha Casa, Minha Vida têm falhas

Fiscalização do Ministério da Transparência identificou problemas de construção como trincas, fissuras, vazamento e infiltração



Fissuras – causas?

Tensão localizada acima da resistência do material.

Estruturas estão fixas no solo ou na rocha.

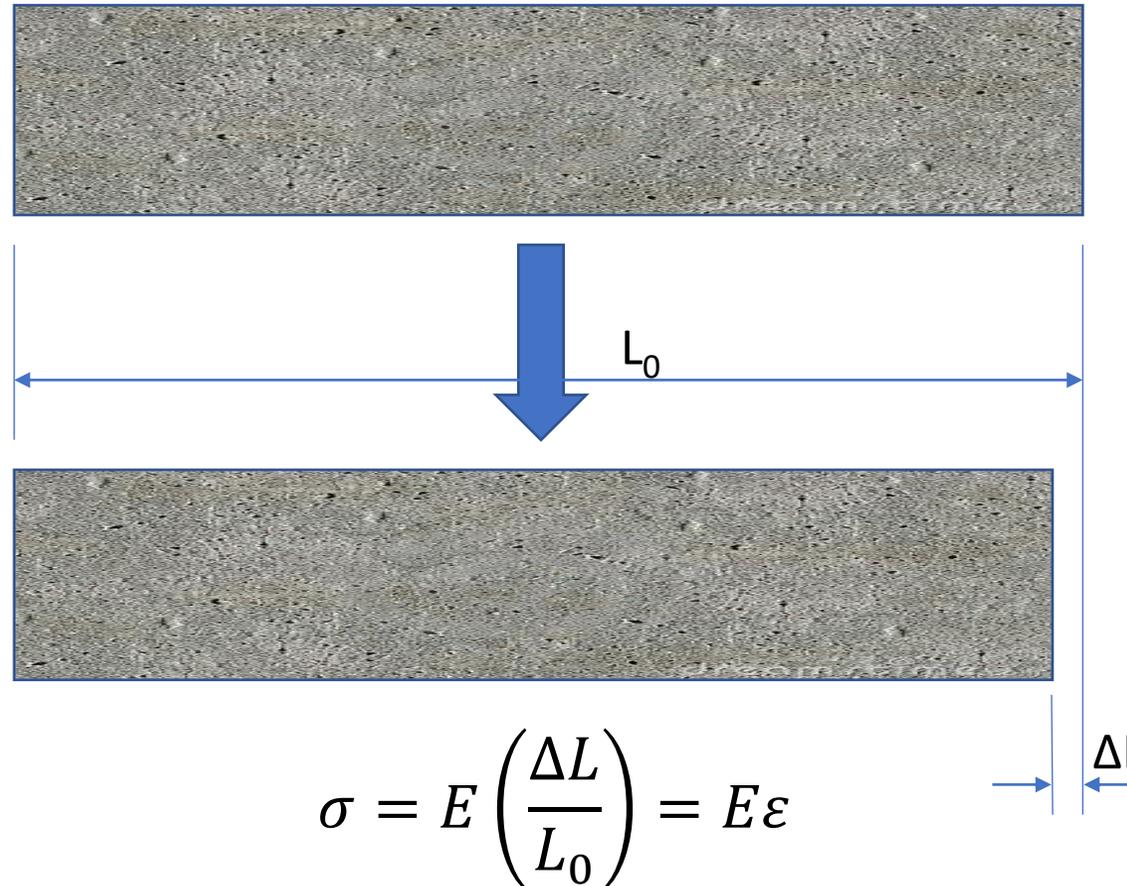
- Deformações por carregamentos não previstos
 - Recalques de fundação
 - Reações químicas expansivas
- **Retração por perda de água de mistura**
 - Diferencial (Gradientes de umidade)
 - Diferencial (gradientes)
- Retração por carbonatação
- Tensões térmicas (retração e expansão)
 - Gradientes térmicos produzidos por calor de hidratação
 - Variação da temperatura ambiental anual



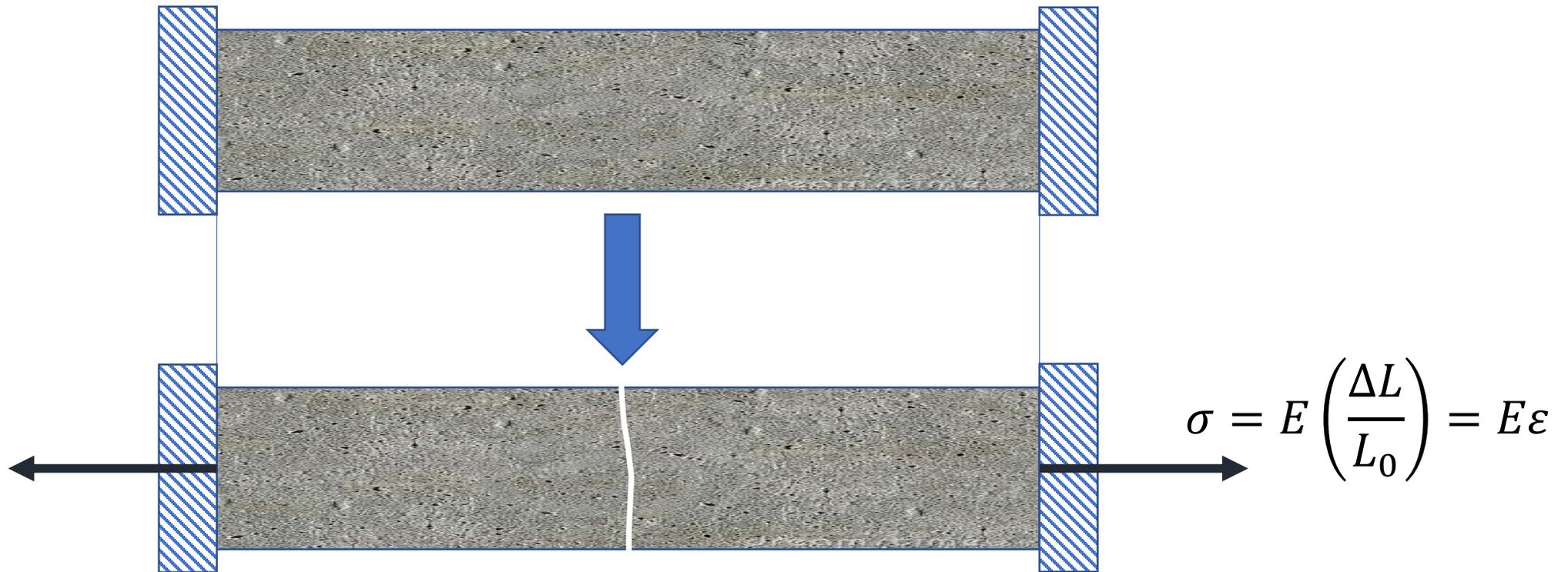
Instabilidade dimensional do concreto

- Fresco: Sedimentação das partículas
 - Aumenta a concentração de água na camada superficial (\gg a/c local)
 - Evaporação na superfície provoca perda de volume superficial
- **Reações** químicas aquecem o concreto
 - Sólidos e a água sofrem expansão
 - Gradiente de temperatura (centro das peças é mais quente)
- Concreto fica sólido
- Concreto começa se resfriar quando a taxa reação química diminui
 - Gradiente térmico (Superfície esfria mais rapidamente que o centro)
- Água em excesso começa evaporar
 - Gradiente de umidade
 - Encurtamento de peças com alta área específica (lajes)

Retração livre: gera apenas redução de volume



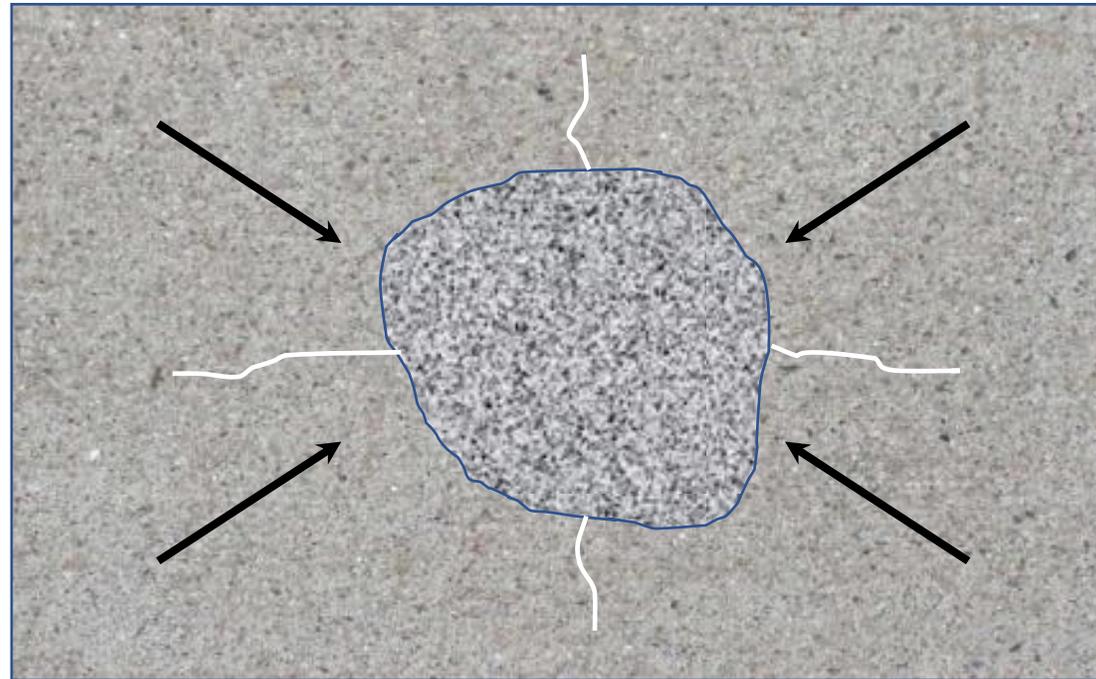
Retração restringida: gera tensões



- Toda estrutura é restringida pelo contato com o solo.

Retração restringida & tensões

- Para que a retração por secagem produza fissuras deve haver restrição à deformação.



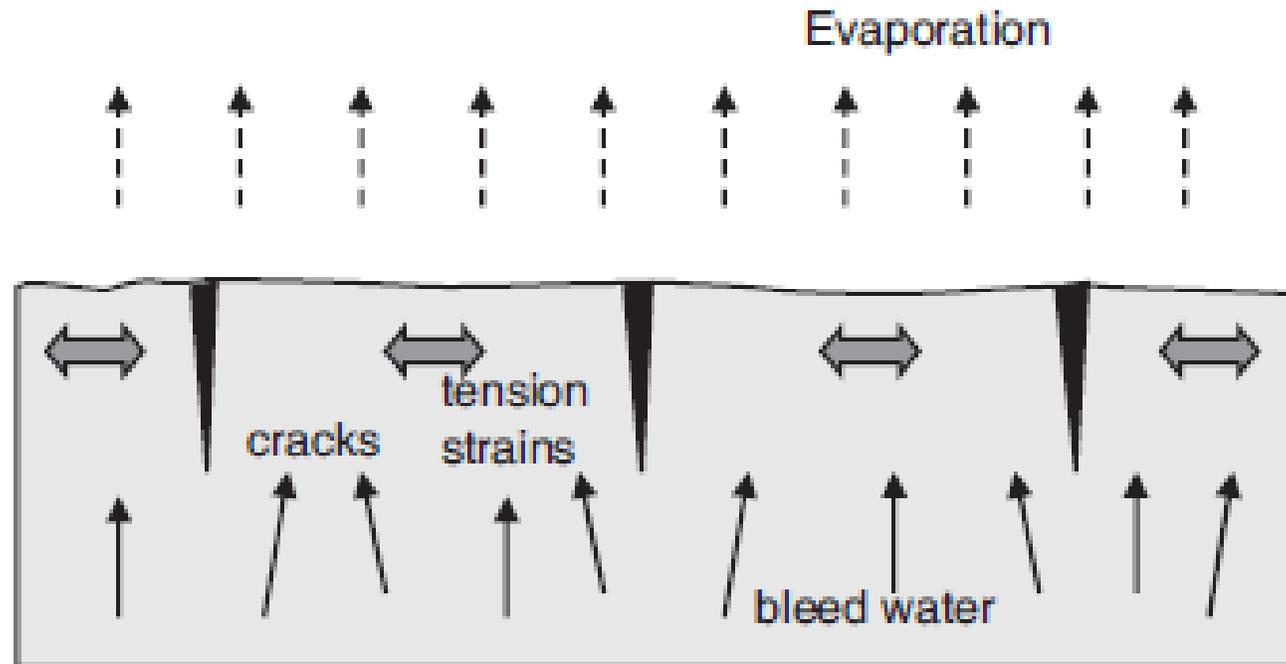
Retração por assentamento durante a pega

- Sedimentação dos sólidos provoca acúmulo de água no topo da peça
- Com o avanço da hidratação, a mobilidade das partículas diminui
- As restrições superficiais podem provocar fissuras.
- A literatura identifica estas fissuras como “assentamento plástico”

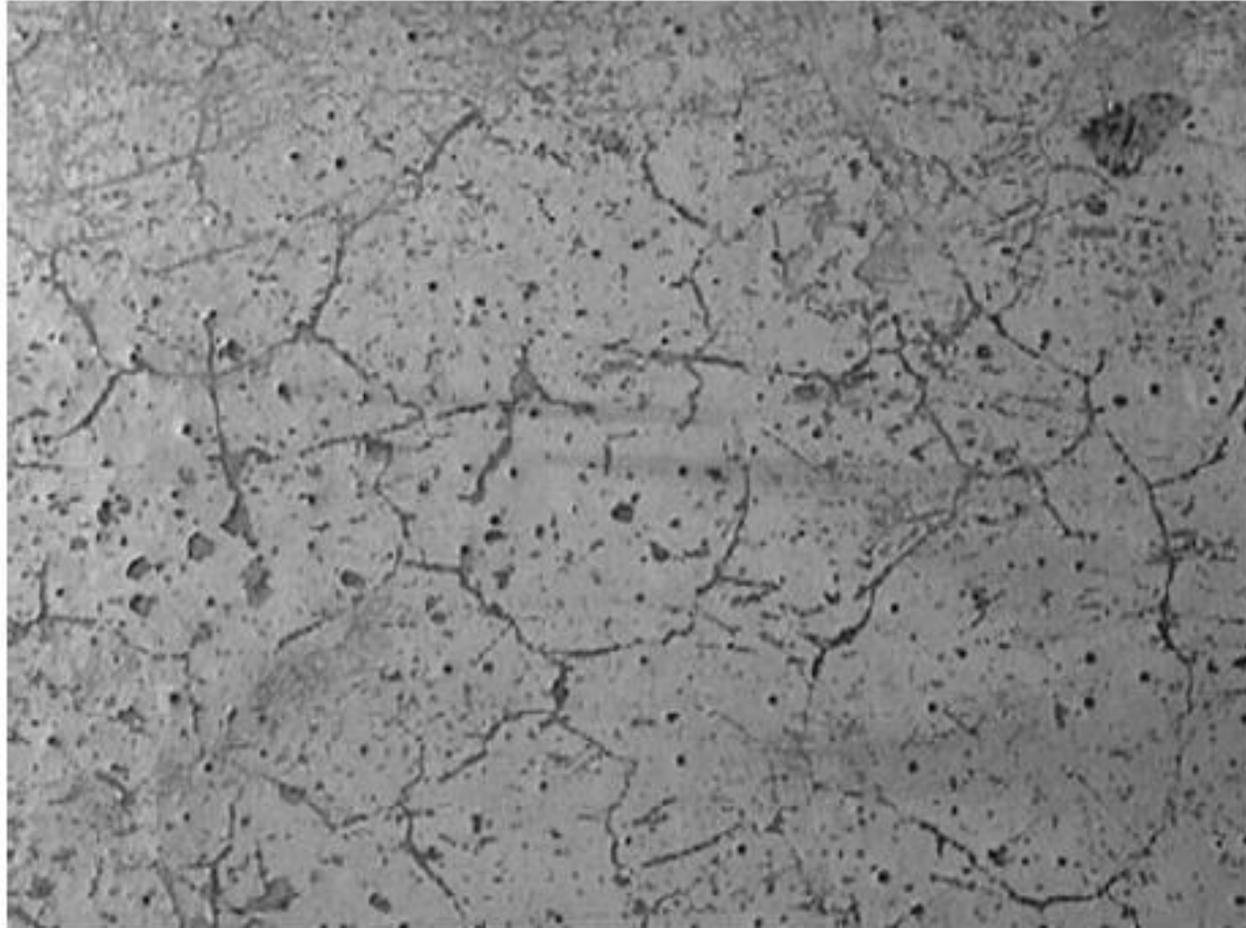


Retração no estado fresco “plástica”

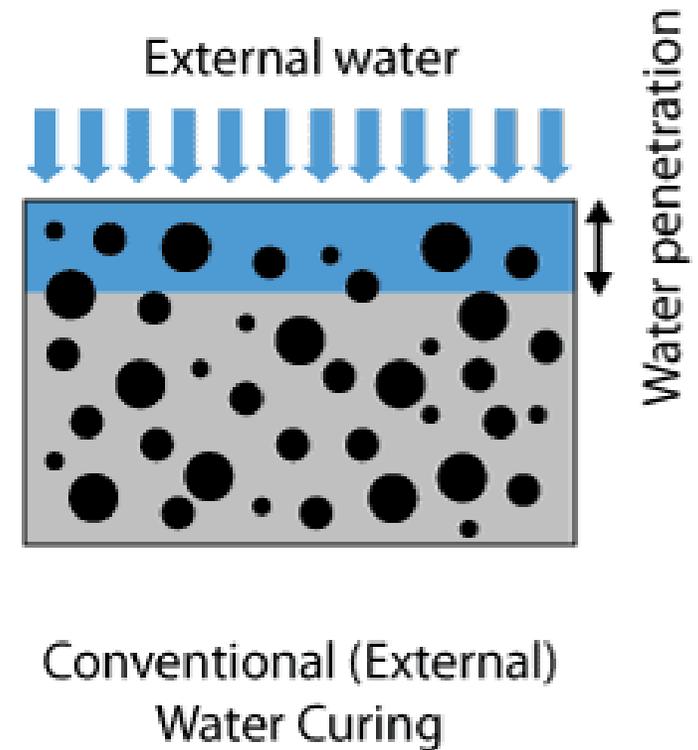
- Taxa de evaporação da água > Taxa de exsudação da água



Retração “plástica”: solução é a cura



Solução é a cura do concreto



Processos de cura: molhagem constante



Processos de cura: cura com geotêxtil



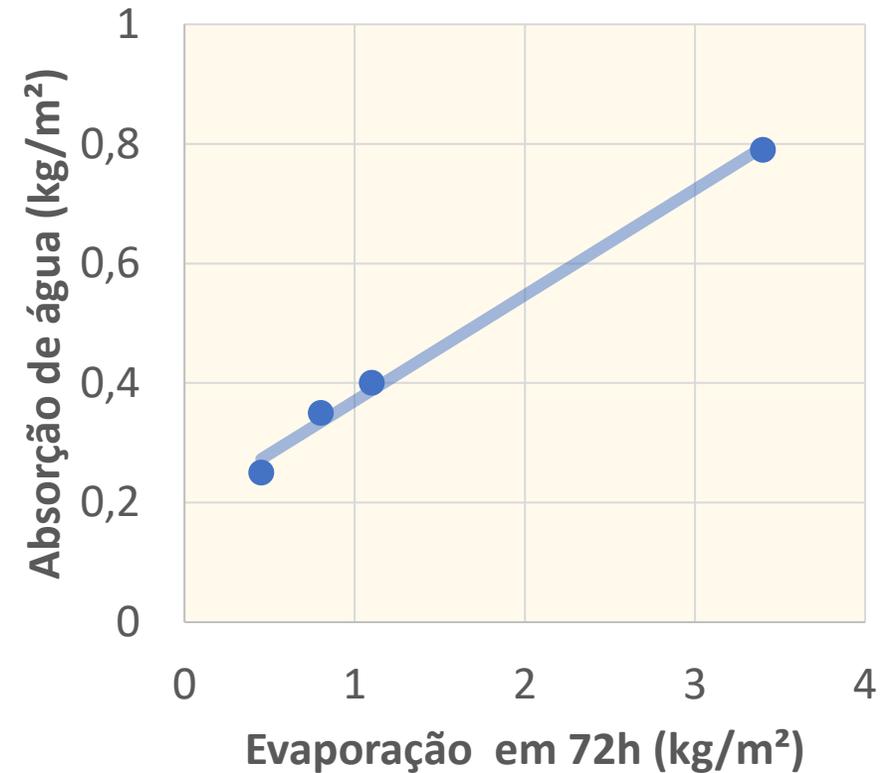
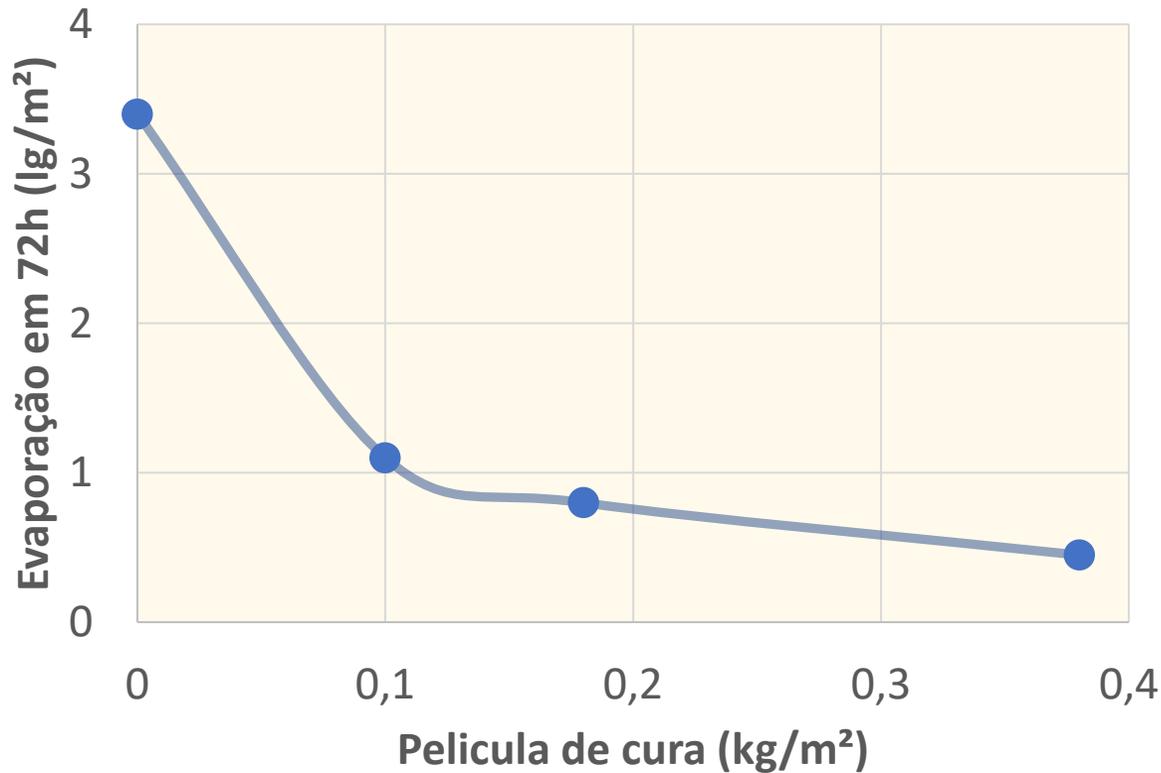
Processos de cura: cura com sacos úmidos



Processos de cura: película orgânica



Reduzir a velocidade de secagem com "película de cura"



Secagem precoce aumenta a porosidade da superfície do concreto. Por que?

Até quando curar?

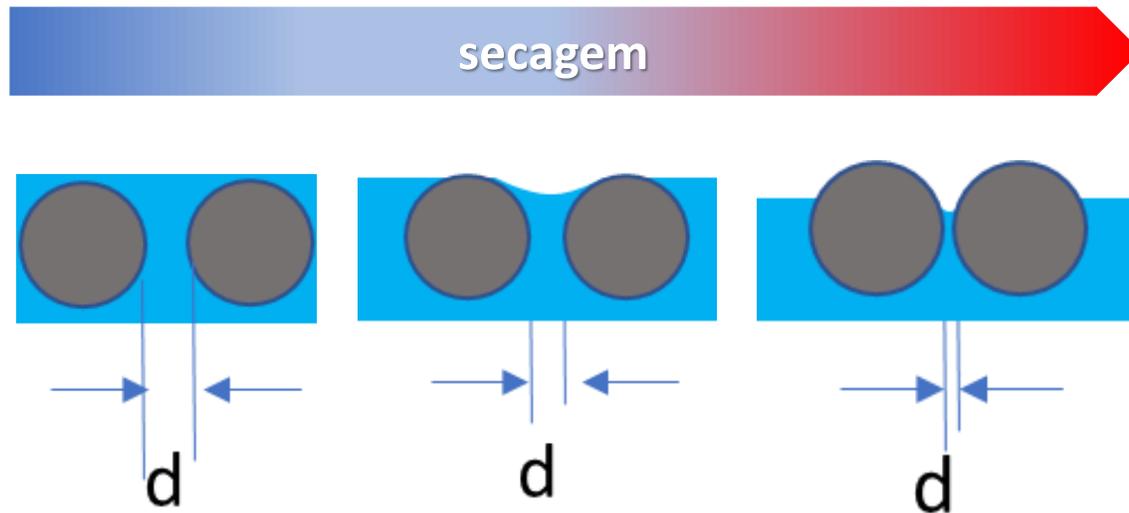
- NBR 14931: Execução de estruturas de concreto (2004)
até $f_{ck} \geq 15$ MPa
- American Concrete Institute (ACI) Committee 301: $> 0,7f_{ck}$

Até quando curar?

GANHO DE RESISTÊNCIA - NBR 6118/2014			
IDADE (dias)	CP III E IV	CP II	CPV - ARI
1	0,16	0,20	0,22
3	0,47	0,60	0,66
7	0,68	0,78	0,82
28	1,00	1,00	1,00

Porque a secagem introduz tensões?

A secagem reduz o volume do sólido causando retração

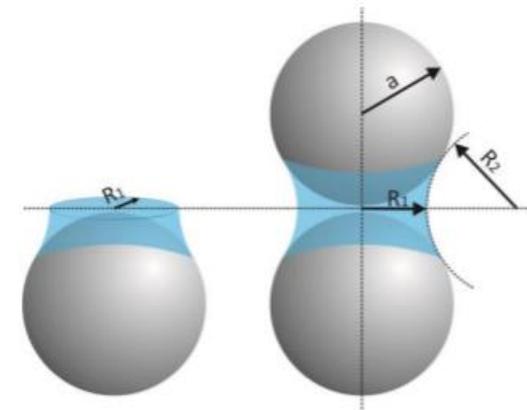


Pasta de cimento é **hidrófila**

Angulo de contato $\sim 30^\circ$

Secagem aproxima partículas, reduzindo o vol sólido

Equação Young-Laplace



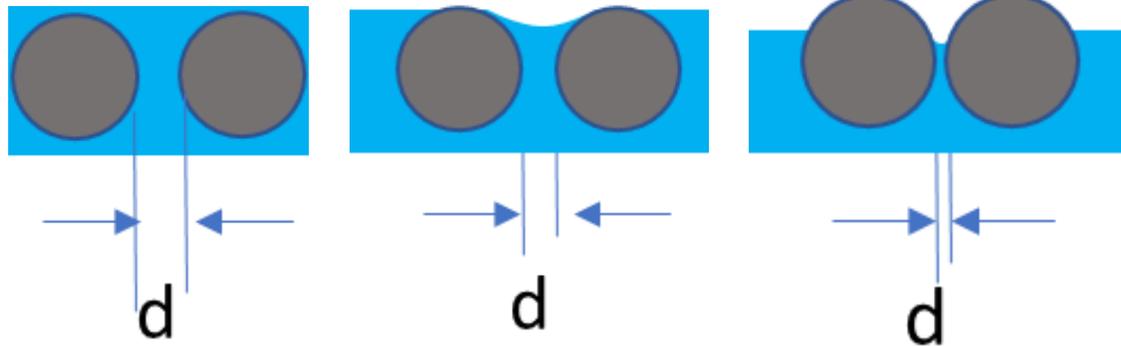
$$p = -\gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

γ = Tensão superficial do fluido

Young An essay on the cohesion of Fluids, 1805

Laplace A la théorie de l'action capillaire, 1805

A molhagem aumenta o volume do sólido: causando expansão

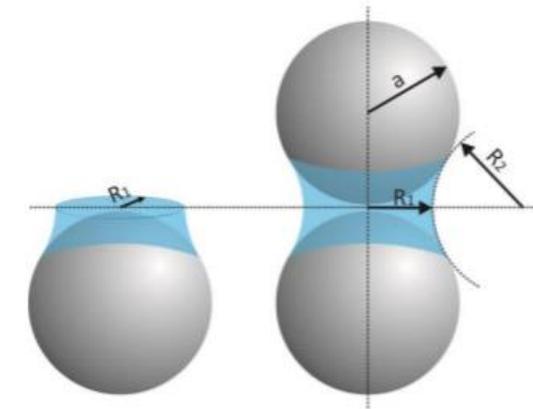


Pasta de cimento é **hidrófila**

Angulo de contato $\sim 30^\circ$

Molhagem afasta as partículas aumentando o vol sólido

Equação Young-Laplace



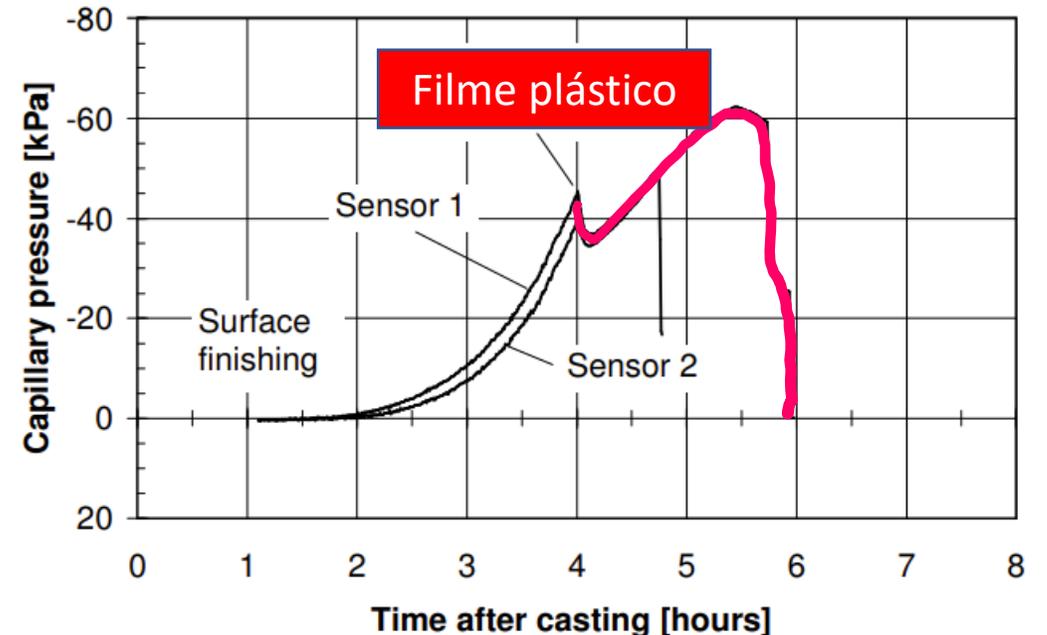
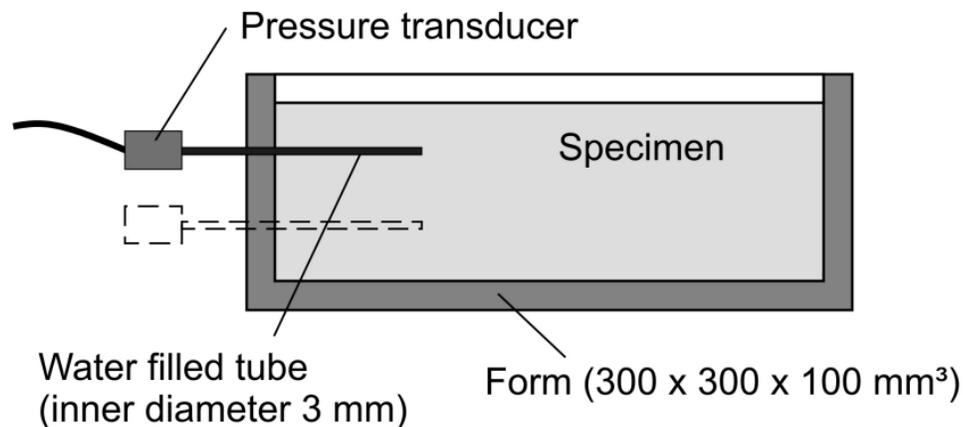
$$p = -\gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

γ = Tensão superficial do fluido

Young An essay on the cohesion of Fluids, 1805

Laplace A la théorie de l'action capillaire, 1805

Variação da pressão capilar com a secagem de concretos

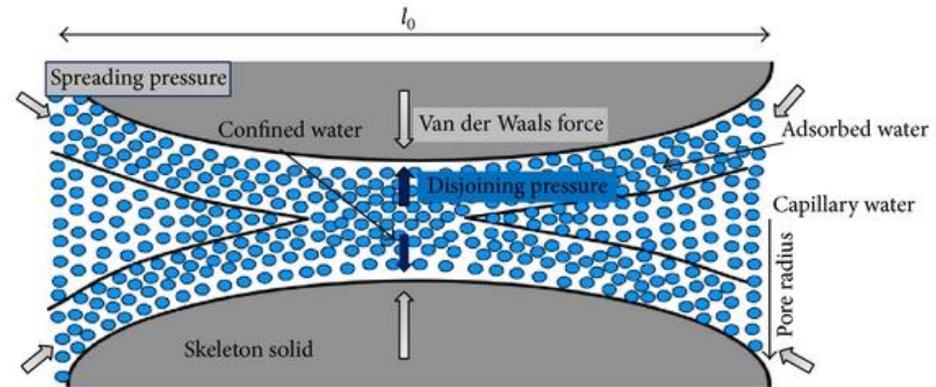
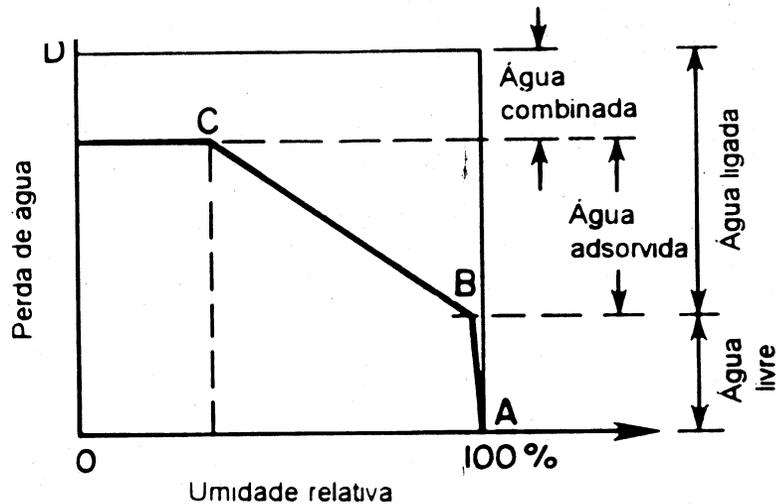


Slowik, Schmidt, Villmann 2010 - [05-0677-0770.PDF \(framcos.org\)](#)

[Schmidt Slowik ConLife09 s \(kesslerdcp.com\)](#)

Tensão capilar

- Quanto menor o poro, maior a tensão capilar e a retração
- A perda de água adsorvida (nos menores poros) é a principal responsável pela retração por secagem do concreto endurecido

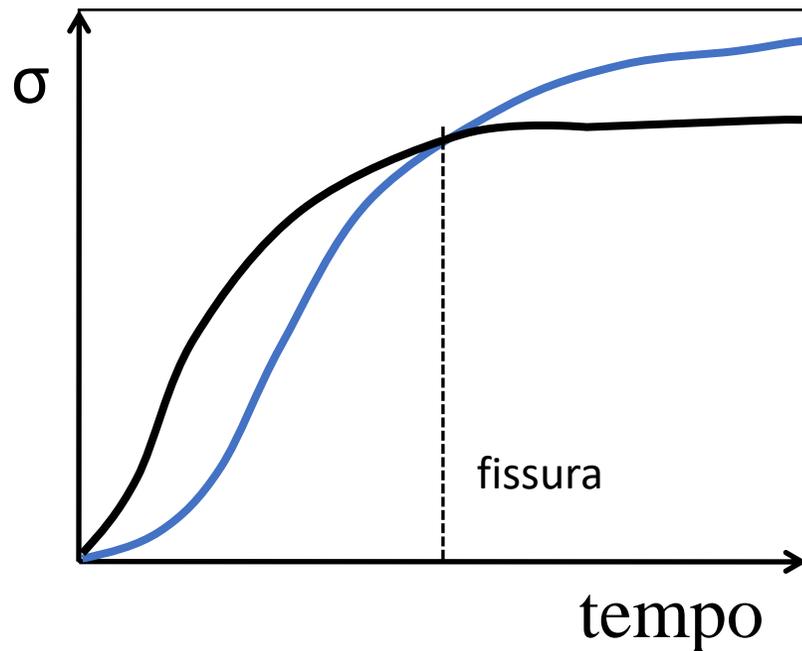


Fonte: Mehta & Monteiro (2008)

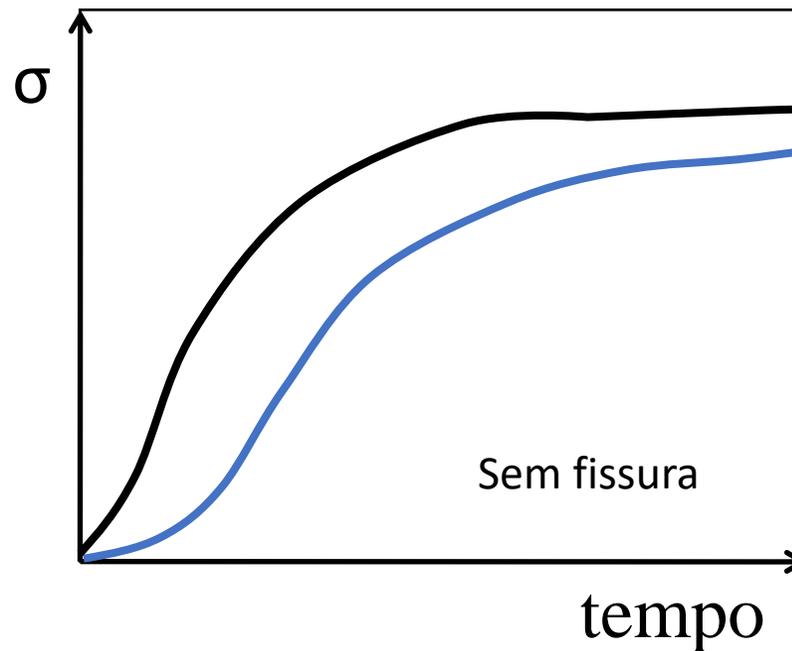
<https://www.hindawi.com/journals/amse/2016/2418219/>

Hidratação, resistência e fissuração

- Realizar cura até atingir $f_{ck} \geq 15 \text{ MPa}$ ou $0,7f_{ck}$

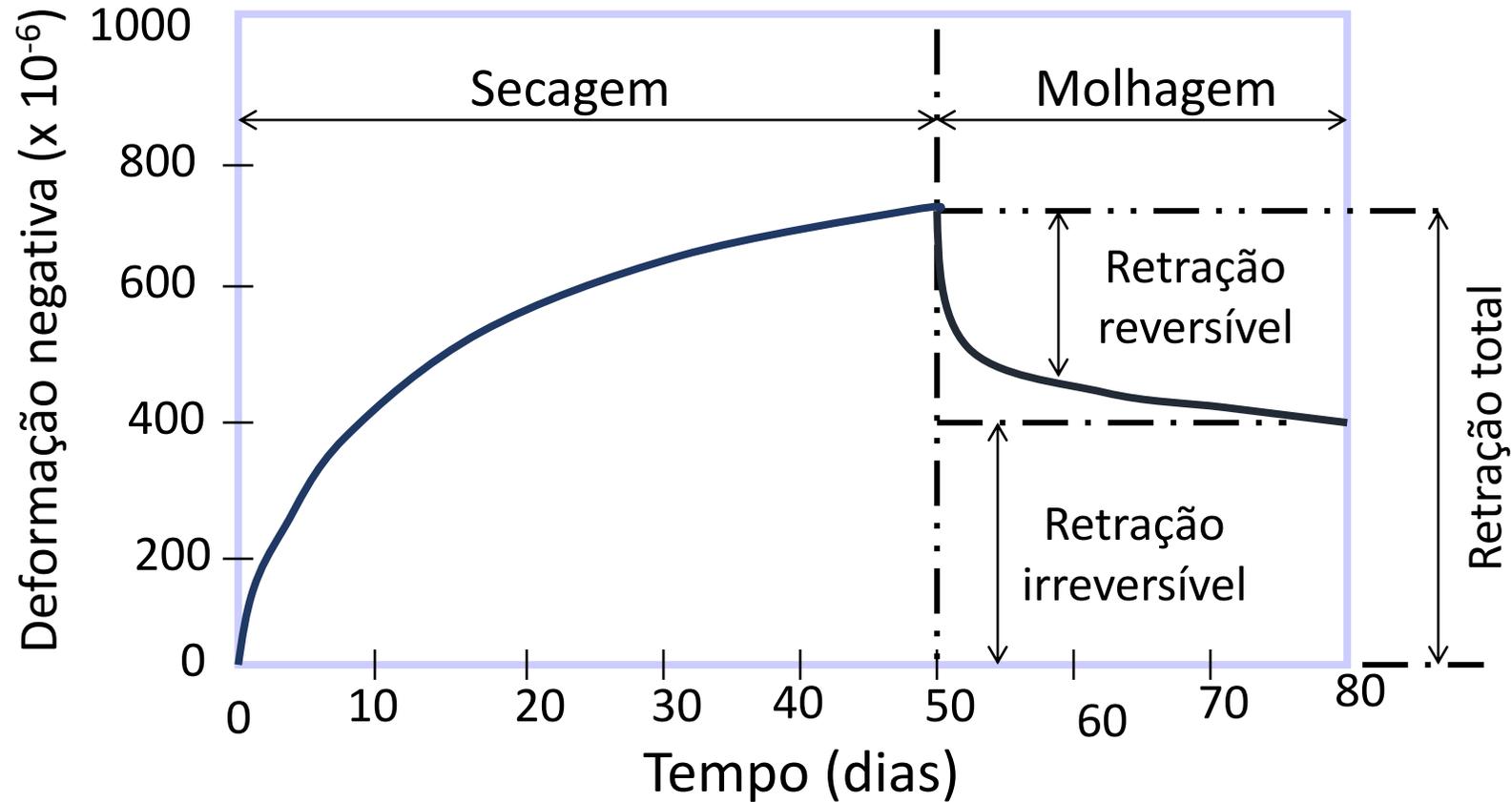


— Tensão da retração por secagem



— Resistência à tração do concreto

Retração (reversível e irreversível)

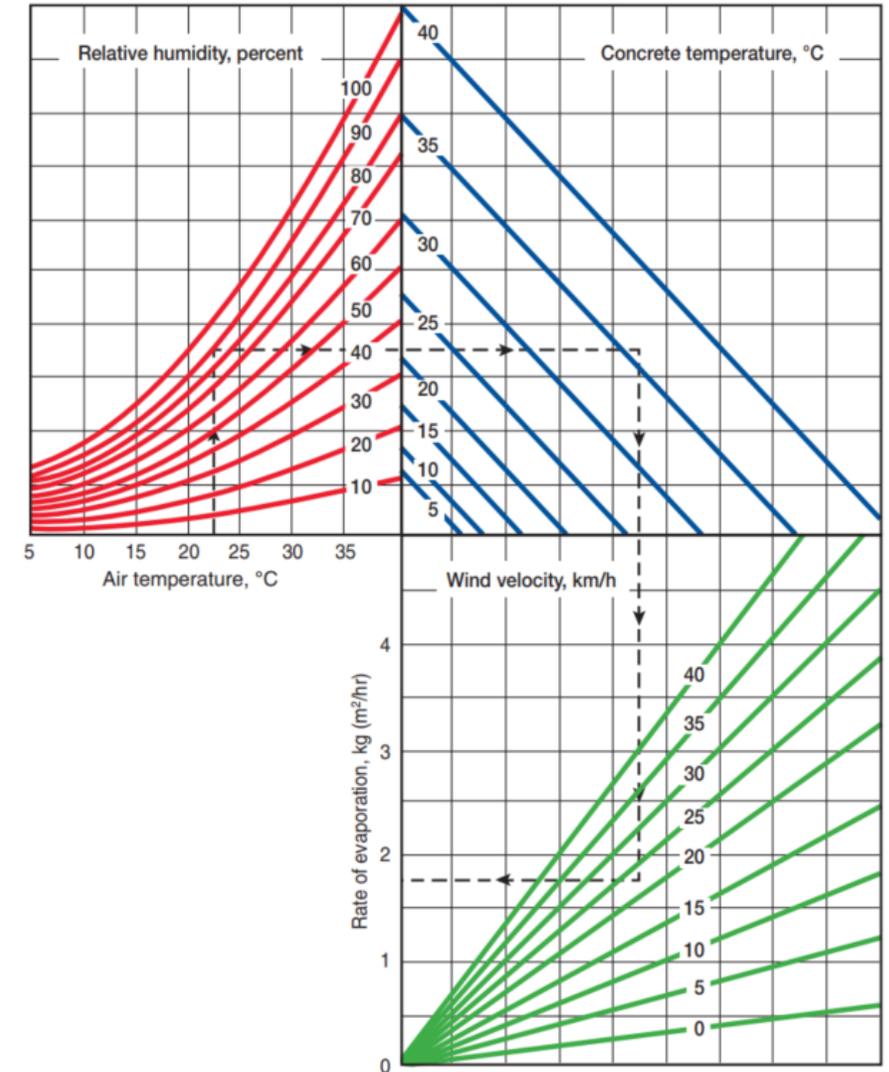


Quais parâmetros controlam a evaporação de água no concreto?

Concreto sem proteção superficial

Taxa de evaporação da água

- Temperatura do ar
- Radiação solar
- Umidade relativa
- Velocidade do vento
- Pressão atmosférica
- Temperatura do concreto
- Variação das propriedades do concreto
- **Modelos**



Estimando a evaporação

Considere um concreto com 30°C de temperatura superficial, exposto a um ambiente com 20°C UR 80% e vento de 15km/h.

1. Compare a estimativa da taxa de evaporação de água um piso de concreto com o modelo de Uno (1998) e do modelo gráfico do American Concrete Institute .
2. Qual o desafio de calcular a evaporação nas primeiras 72h?
3. Identifique pelo menos um fator relevante para a taxa de evaporação que é negligenciado.

$$E = 5([T_c + 18]^{2.5} - r \cdot [T_a + 18]^{2.5})(V + 4) \times 10^{-6}$$

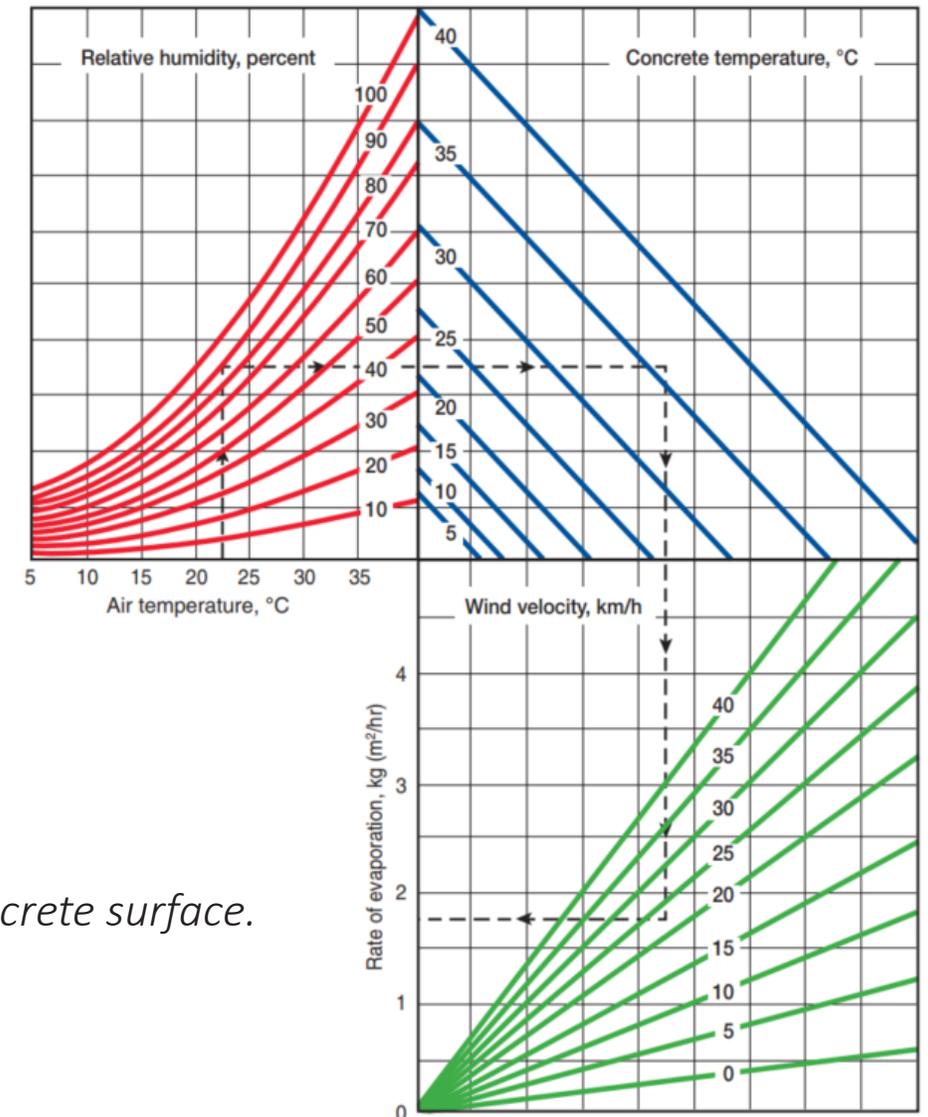
E = evaporation rate (kg/m₂/h)

V = average wind speed in km/h (mph), measured at 0.5 m above the concrete surface.

T_c = concrete (water surface) temperature, °C

r = (relative humidity)

T_a = air temperature °C



Resolução

- Temperatura ambiente = 20°C
- UR = 80%
- Volume/área do concreto = $0,05 \text{ m}^3 / 1 \text{ m}^2 = 0,05 \text{ m}$
- TCONCRETO = 20°C + 10°C = 30°C
- Velocidade do vento = 16 km/h
- Taxa de evaporação = $0,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$
- Período = 24 h
- Quantidade de água = $0,8 \times 24 = 19,2 \text{ kg}/\text{m}^2$

Exercício 1

- Como combater o risco de fissuração devido à retração por secagem? Justifique.

Fissuras associadas a gradientes térmicos (hidratação)

Resfriamento e fissuração

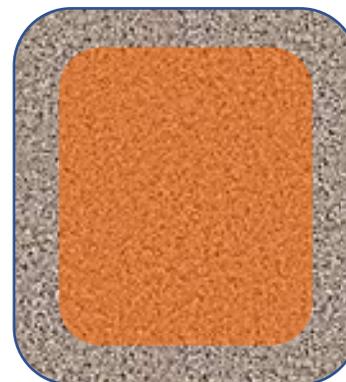
- O cimento gera calor durante sua hidratação
- O concreto é mau condutor e conserva o seu interior aquecido
- A parte externa perde calor para o ambiente



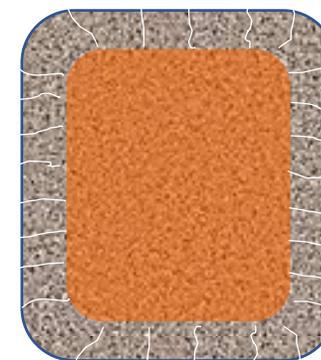
Lançamento do concreto



Aquecimento do concreto pelas reações de hidratação

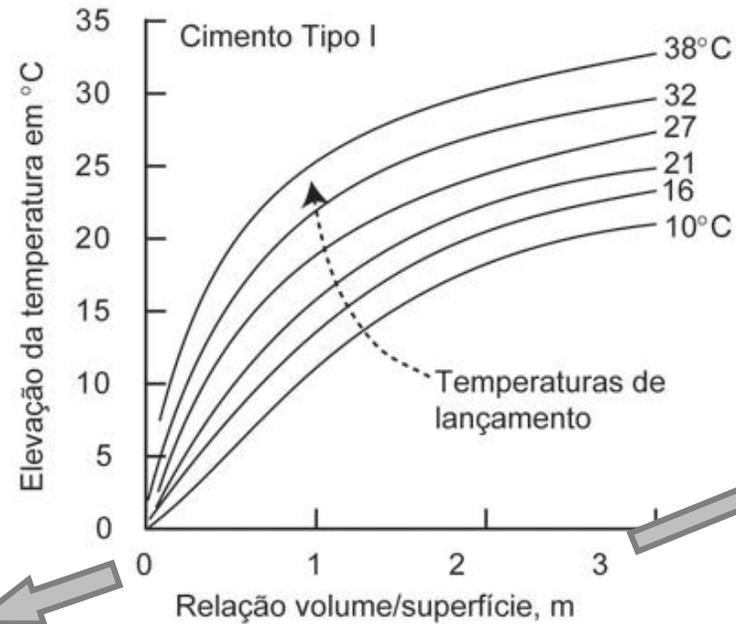


Resfriamento do concreto das bordas para o centro (baixa condutividade)



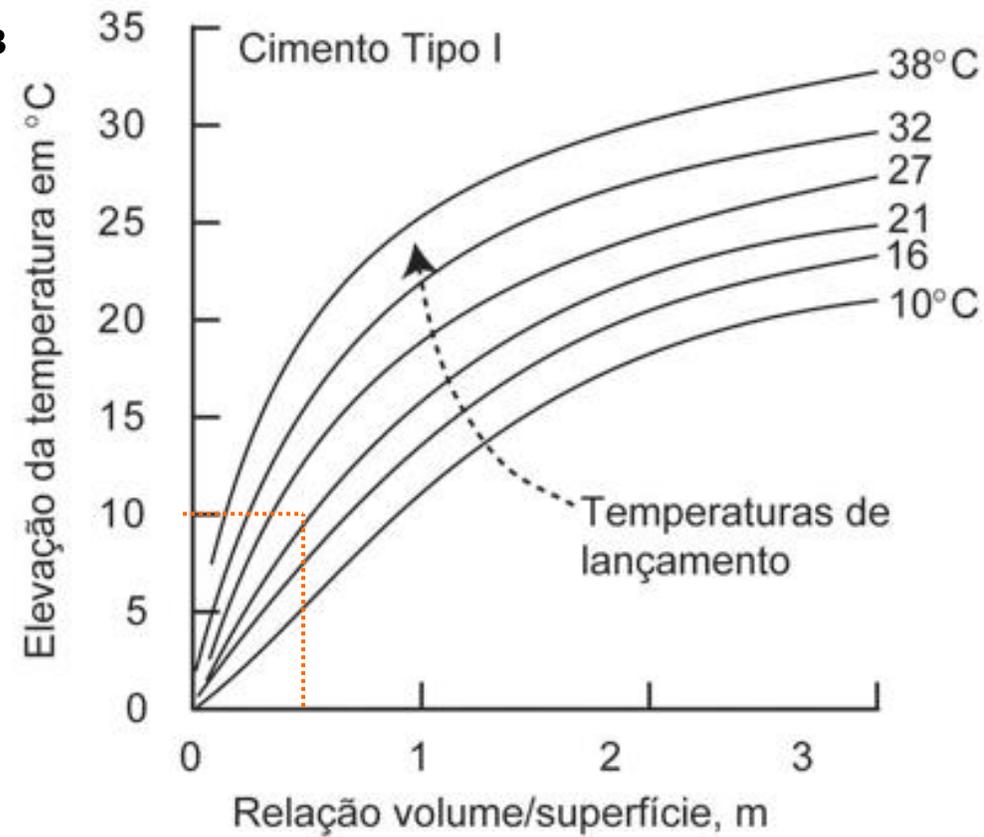
Retração da superfície com restrição da parte interna gerando fissuração

Elevação da temperatura do concreto: efeito da geometria

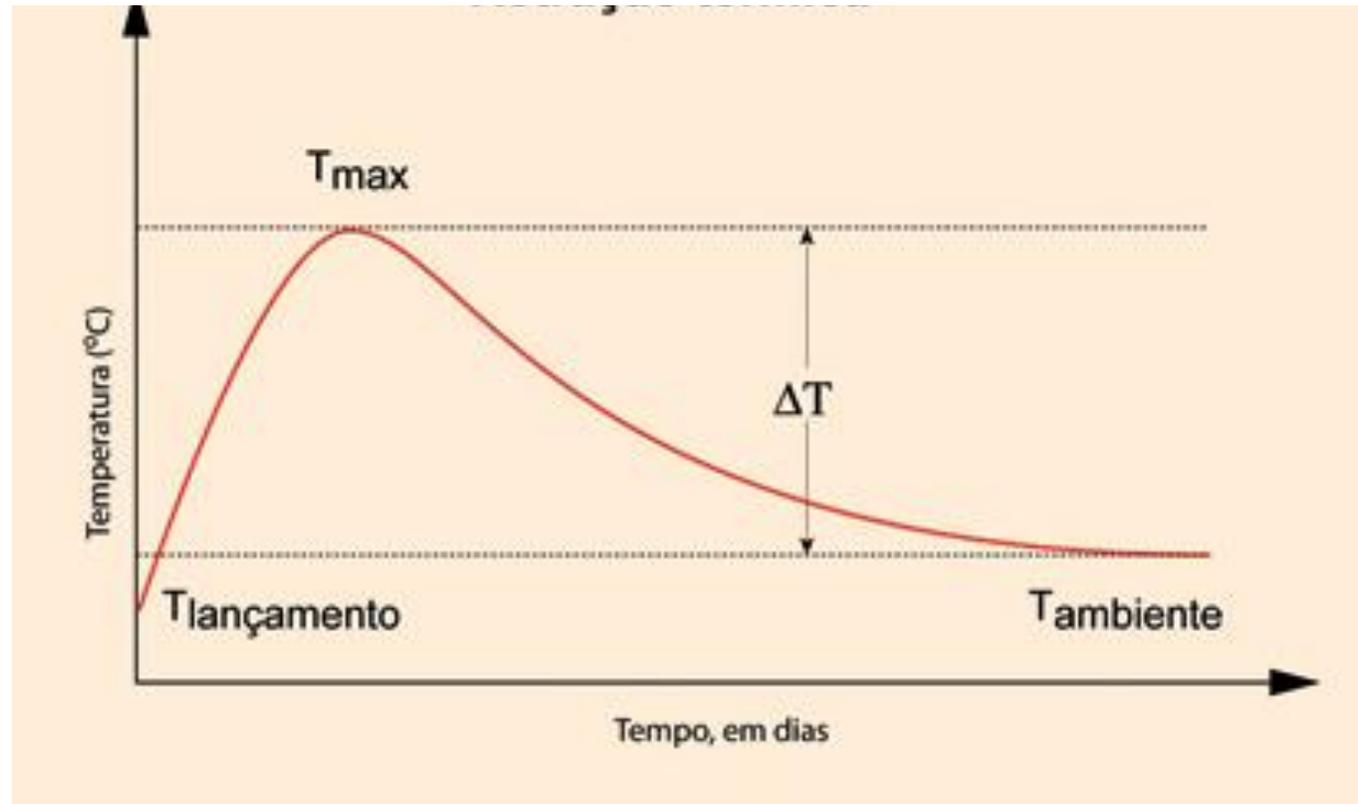


Estimativa da elevação de temperatura do concreto

$$C_{\text{cimento}} = 223 \text{ kg/m}^3$$



Elevação da temperatura do concreto



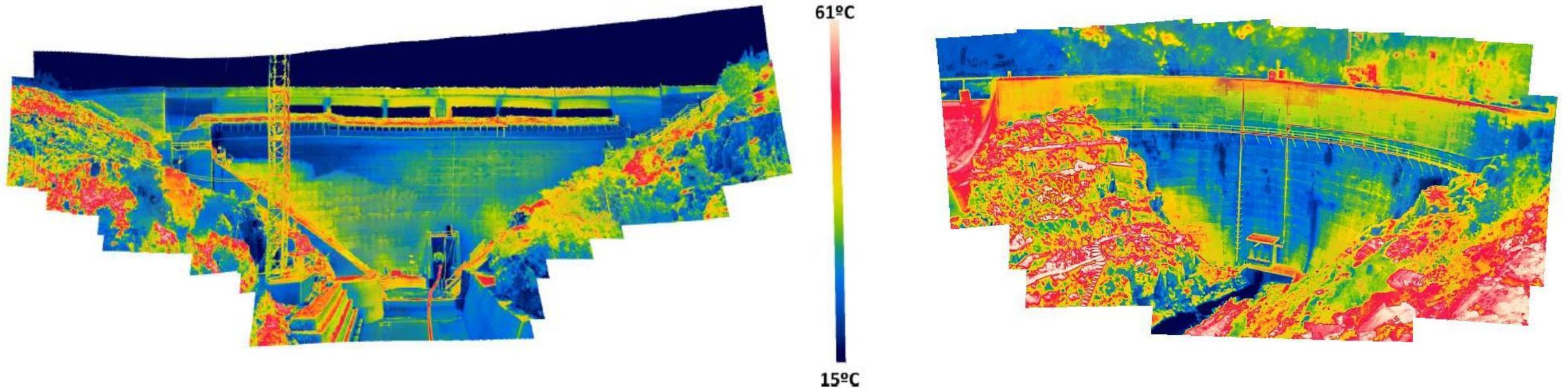
Exercício 2

Faça uma verificação simplificada do risco de fissuração de um bloco de concreto com as seguintes condições:

- Temperatura de lançamento: 32°C
- Elevação da temperatura: 26°C
- Módulo de elasticidade do concreto: $E = 19.000 \text{ MPa.m/m}$
- Coef. de dilatação térmica do concreto: $a = 10^{-5} \text{ m/m}^\circ\text{C}$
- Resistência à tração do concreto: $f_{ct} = 4 \text{ MPa}$

Gradientes térmicos em barragem de concreto massa

- Imagem obtida por câmera de infravermelho



Exercício 3

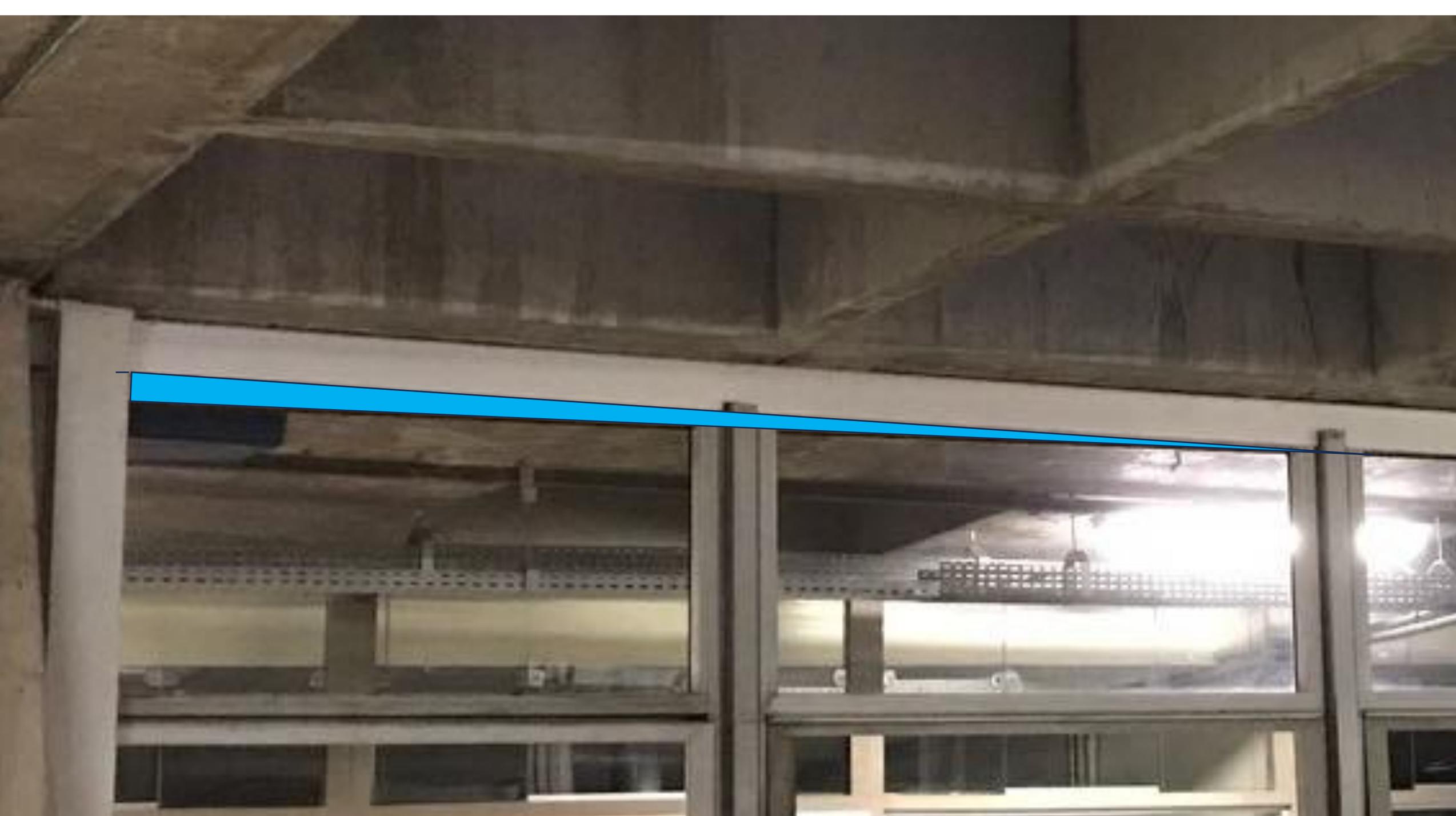
- Quais estratégias podem ser adotadas para controlar a gradientes térmicos do concreto? Justifique.

Fluência

O concreto endurecido continua se deformando com o tempo



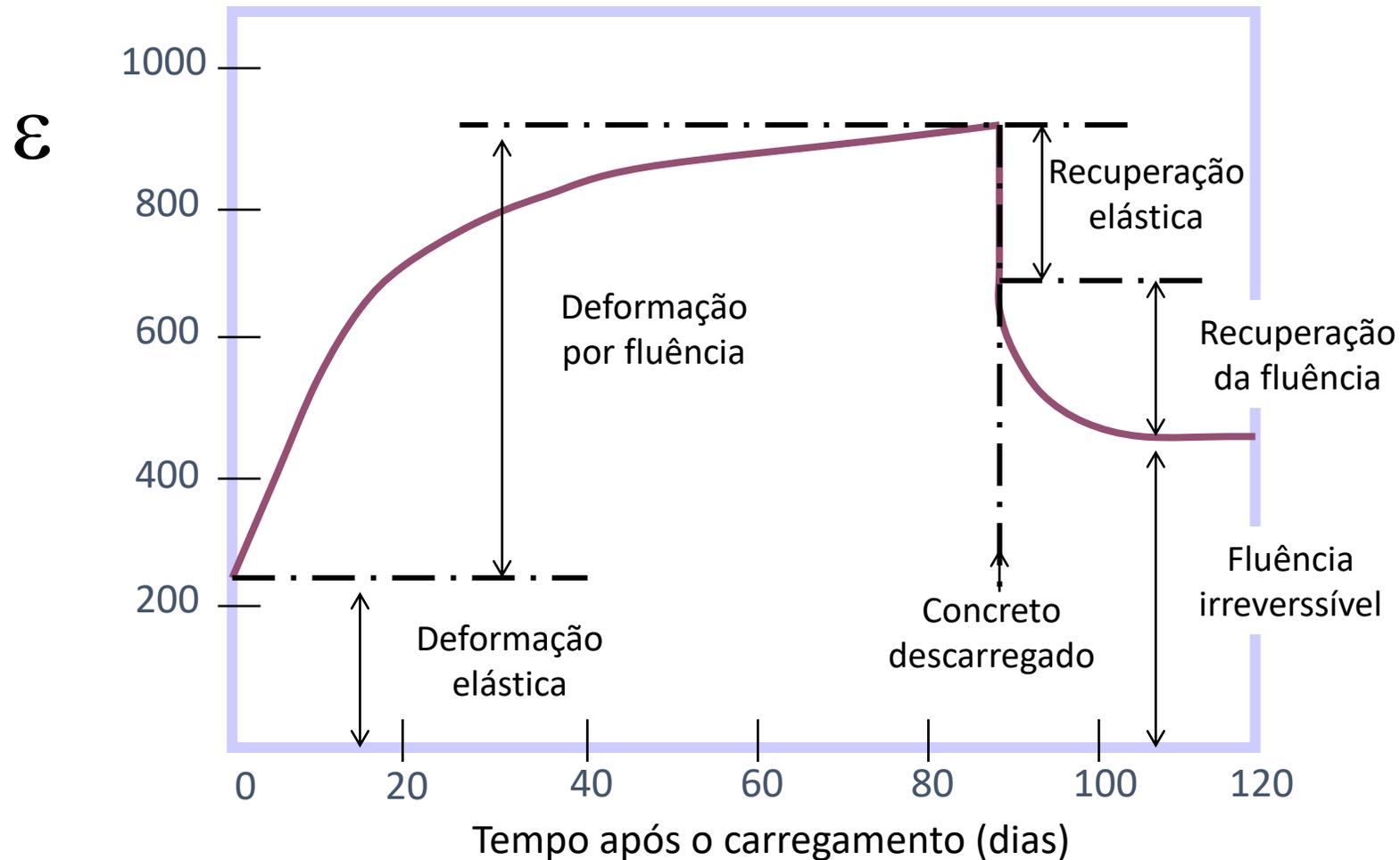




Deformação lenta ou fluência do concreto

- Deformação adicional a elástica em cargas de longa duração
 - Devido à movimentação de água pelos poros do concreto
 - Devido à acomodação dos cristais na pasta de cimento hidratada

Deformação por fluência também é parcialmente reversível



Quais estratégias devem ser adotadas para controlar a fluência do concreto? Justifique.

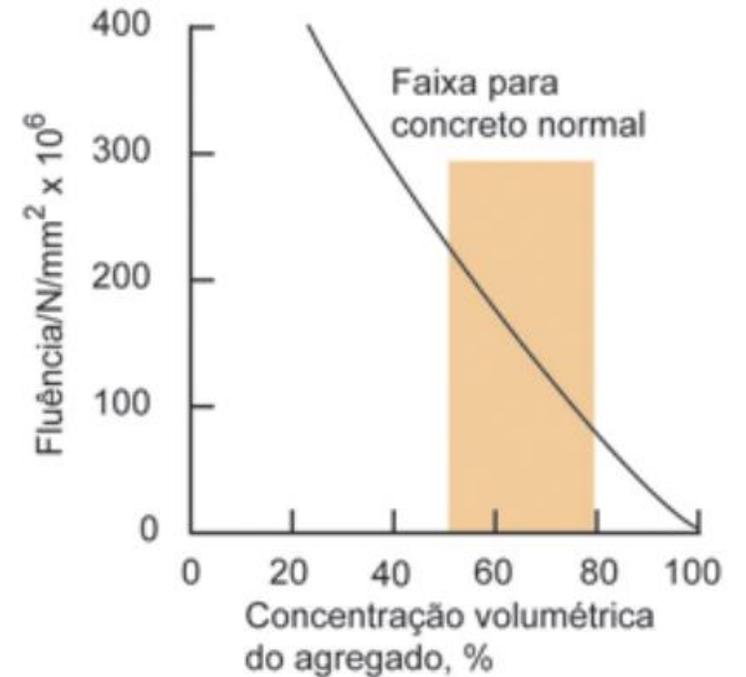
Diminuindo a deformação por fluência

- Reduzir o volume de pasta e a quantidade de água ou aumentar o volume relativo de agregado;
- Usar agregados de maior módulo de elasticidade.

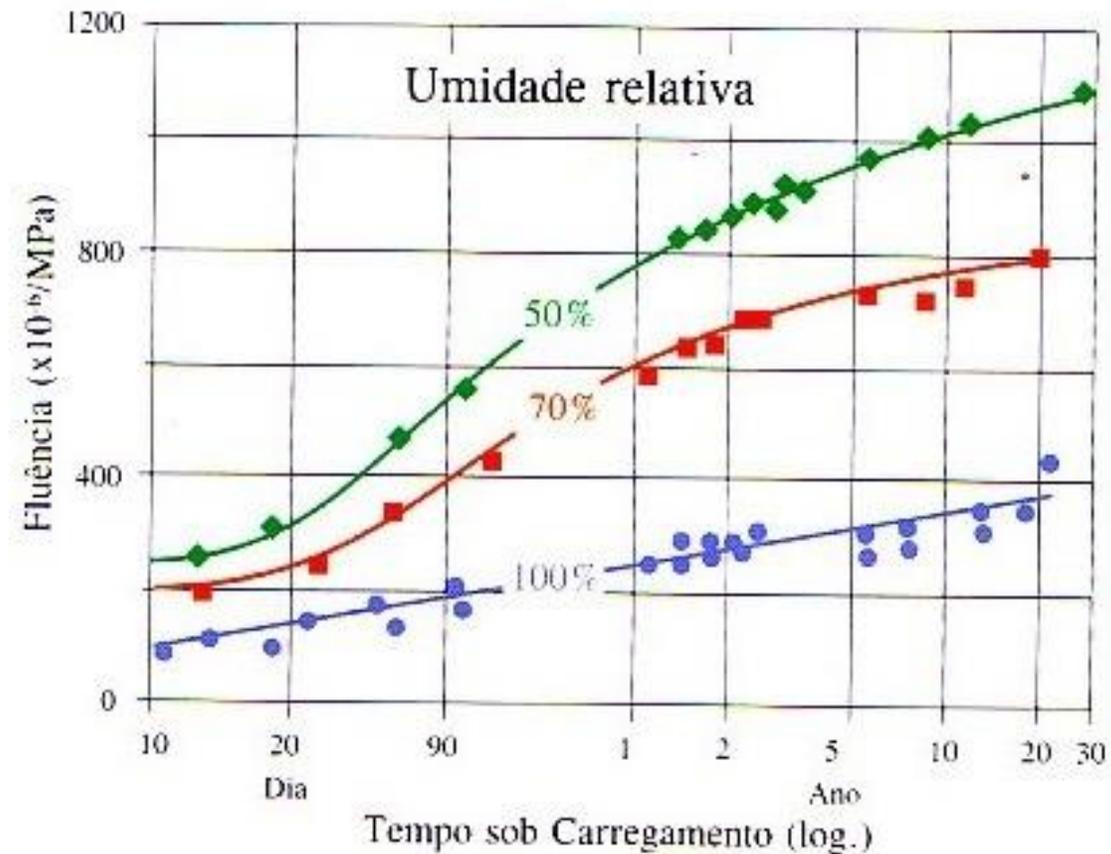
Onde:

$$\frac{C_C}{C_P} = (1 - g)^\alpha$$

- C_C : fluência do concreto
- C_P : fluência da pasta de cimento
- g : teor de agregados
- α : constante



Deformação por fluência: umidade e temperatura influenciam



Exercício 4

- Indique como a geometria da estrutura e a taxa de armadura podem influenciar a deformação por fluência.

