



EDI-33

Materiais e Processos Construtivos

Concreto

Frank Cabral de Freitas Amaral – 1º Ten.-Eng.º
Instrutor

Março/2005



Programação

SEMANA	DATA	TÓPICOS
1	06/mar	APRESENTAÇÃO DO CURSO
	09/mar	TIPOS DE MATERIAIS E PROPRIEDADES
2	13/mar	AGREGADOS
	16/mar	
3	20/mar	AGLOMERANTES
	23/mar	
4	27/mar	CONCRETO
	30/mar	
5	3/abr	
	6/abr	
6	10/abr	
	13/abr	
7	17/abr	PROVA 1º BIMESTRE
	20/abr	AÇOS
8	24/abr	
	27/abr	
	29/abr a 6/mai	SEMANINHA



Concreto

- Concreto fresco
- Aditivos
- Concreto endurecido
 - Estrutura
 - Resistência
 - Estabilidade dimensional
- Dosagem
- Durabilidade
 - Patologia



Estrutura

Na preparação do concreto, com a mistura dos agregados graúdos e miúdos com cimento e água, tem início a reação química do cimento com a água, resultando gel de cimento, que constitui a massa coesiva de cimento hidratado.

A reação química de hidratação do cimento ocorre com redução de volume, dando origem a poros, cujo volume é da ordem de 28% do volume total do gel.

Durante o amassamento do concreto, o gel envolve os agregados e endurece com o tempo, formando cristais. Ao endurecer, o gel liga os agregados, resultando um material resistente e monolítico – o concreto.



Estrutura

A estrutura interna do concreto resulta bastante heterogênea: adquire forma de **retículos espaciais de gel** endurecido, de **grãos de agregados** graúdo e miúdo de várias formas e dimensões, envoltos por grande quantidade de **poros e capilares**, portadores de **água** que não entrou na reação química e, ainda, **vapor d'água e ar**.

Fisicamente, o concreto representa um material capilar pouco poroso, sem continuidade da massa, no qual se acham presentes os três estados da agregação – sólido, líquido e gasoso.



Estrutura

- Heterogeneidade (sistema bifásico x trifásico)
- Distribuição não homogênea
- Estrutura não estável

Pasta e zona de transição sujeitas a modificações ao longo do tempo e devido a condições de umidade e temperatura!

- Em sólidos: Resistência x Porosidade



Estrutura - *cristais*

- Etringita (Sulfoaluminato de cálcio hidratado)
Primeiros cristais
- C-S-H: Silicato de cálcio hidratado
Pequenos cristais fibrilares, dimensões coloidais e tendência de aglomeração, constitui de 50 a 60% do volume de sólidos, fase mais importante na determinação das propriedades da pasta
- Ca(OH)_2 : Hidróxido de cálcio
Grandes cristais, constituem de 20 a 25% do volume de sólidos, quando em presença elevada contribui desfavoravelmente sobre a resistência química por ser mais solúvel que o C-S-H



Estrutura - *poros*

- Espaço interlamelar no C-S-H
- Vazios capilares
- Ar incorporado ou aprisionado

Não é a porosidade total, mas a distribuição e o tamanho dos poros que controla efetivamente a resistência, a permeabilidade e as variações de volume em uma pasta de cimento endurecida!

- Grandes: resistência à compressão e permeabilidade
- Pequenos: retração por secagem e fluência



Estrutura - água

- **Capilar**: volume de água livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida dos agregados
- **Livre**: água capilar que uma vez removida não causa qualquer variação volumétrica
- **Retida por tensão capilar** (capilares pequenos): sua remoção pode causar retração do sistema
- **Adsorvida**: se encontra nas proximidades da superfície do sólido, ié, sob influência de forças de atração (principal responsável pela retração por secagem)
- **Quimicamente combinada**: parte integrante da estrutura de compostos hidratados



Estrutura - *zona de transição*

- ✓ Concreto recém-compactado: filme de água forma-se ao redor das partículas grandes de agregado
- ✓ Relação a/c mais elevada na proximidade do agregado graúdo (*exsudação interna*)
- ✓ Formação de cristais:

Fase 1: *estringita* e Ca(OH)_2

cristais grandes - estrutura mais porosa

Fase 2: C-S-H e outros menores

cristais menores – preenchimento de vazios – aumento da densidade e da resistência

Com o passar da interação química, a taxa de aumento da resistência da zona de transição fica maior que a da matriz da pasta, devido à formação de novos cristais nos vazios.



Estrutura - *zona de transição*

Quanto maior o tamanho do grão, mais espesso o filme de água e maior a relação a/c!

A quantidade de microfissuras depende da distribuição granulométrica, tamanho dos grãos, teor de cimento, relação a/c, grau de adensamento, condições de cura, umidade e histórico térmico do concreto!

O concreto tem microfissuras na zona de transição antes mesmo da estrutura ser carregada!



Resistência

- A. Resistência à compressão
- B. Resistência à tração



A. Resistência à compressão

- Fatores que afetam os ensaios de resistência
 - ✓ Relação a/c
 - ✓ Idade
 - ✓ Granulometria e formato dos grãos
 - ✓ Tipo de cimento
 - ✓ Forma e dimensões dos CPs
 - ✓ Velocidade de aplicação e carga do ensaio
 - ✓ Duração da carga

$$f_c \sim 10 \times f_t$$



A1. Fatores de influência

- Relação a/c

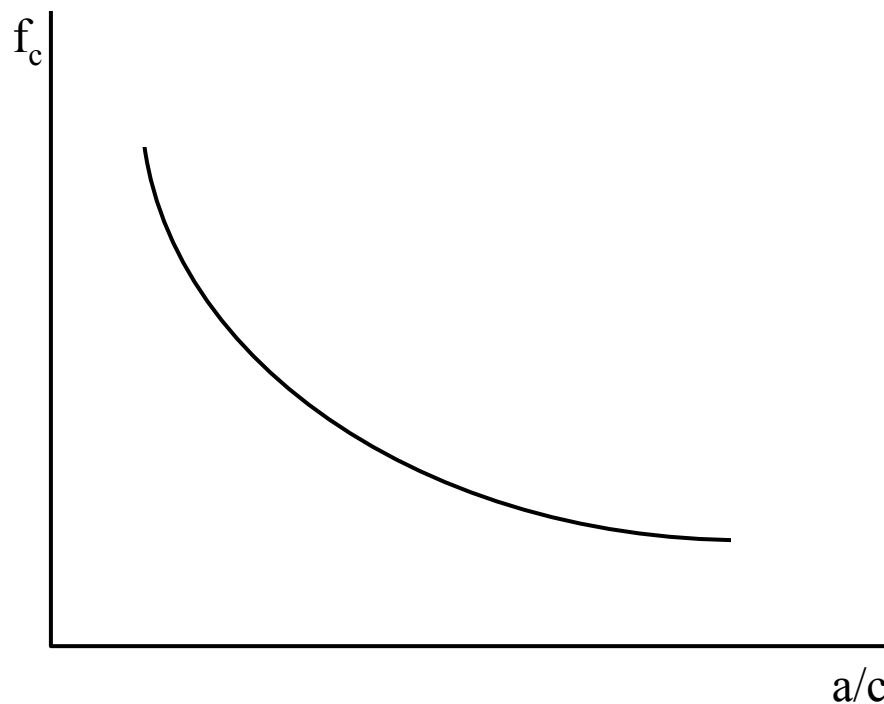
Dentro do campo dos concretos plásticos, a resistência aos esforços mecânicos, bem como as demais propriedades do concreto endurecido, variam na razão inversa da relação água cimento.

Lei de Abrams:

$$f_{cj} = A / B^{a/c}$$



Curva típica – relação a/c



De posse dos valores de resistência à compressão, pode-se determinar as constantes A e B da Lei de Abrams (dosagem experimental)



A1. Fatores de influência

- Idade

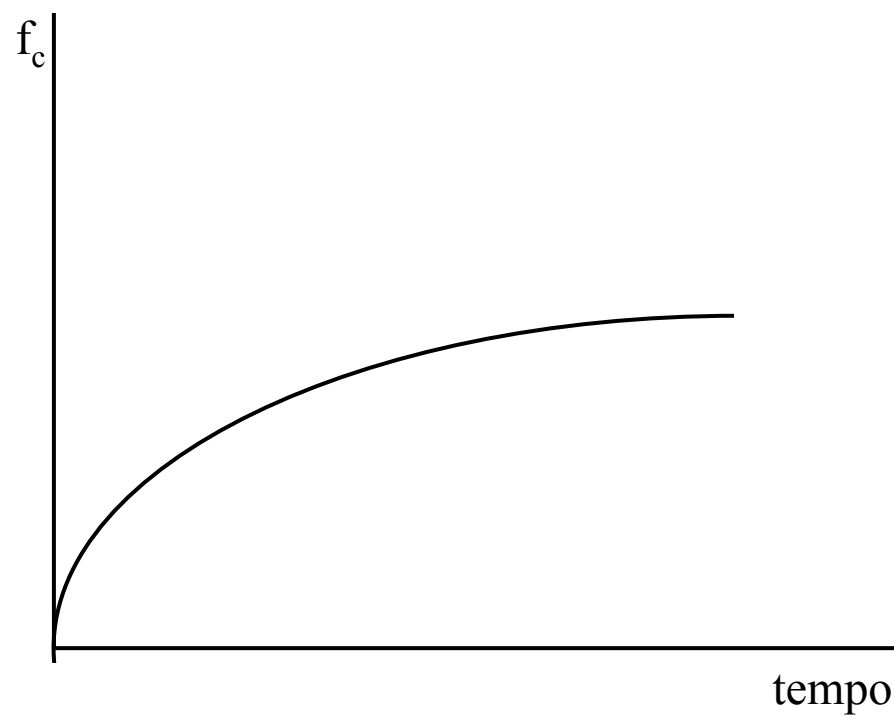
$$f_{c28} = 1,25 \text{ a } 1,50 f_{c7}$$

$$f_{c90} = 1,05 \text{ a } 1,20 f_{c28}$$

$$f_{c365} = 1,20 \text{ a } 1,40 f_{c28}$$



Curva típica - idade





A1. Fatores de influência

- Temperatura (cura térmica)

Lei de Saul – Maturidade

$$(T1 + 10)\Delta t1 = (T2 + 10)\Delta t2$$

Exemplo:

70°C por 20 horas = 10°C por 80 horas



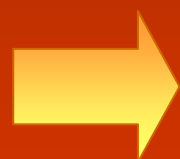
A2. Ensaio de resistência à compressão

- NBR 5739
- Moldagem de corpos de prova
- Diâmetro = $1/2 \times$ Altura (usual: 15 x 30 cm)
- Adensamento em 3 camadas
- Expulsão de bolhas de ar
- Acabamento e desempenho
- Retífica



A3. Resistência característica

- n resultados de ruptura de n corpos de prova



Resistência média (f_{cj})

Desvio padrão (S_d)

- Resistência característica à compressão:

$$f_{ck} = f_{cj} - 1,65 S_d$$

Valor que representa uma probabilidade de 95% de que se apresentem valores individuais de resistência maiores que o f_{ck} .



Distribuição normal

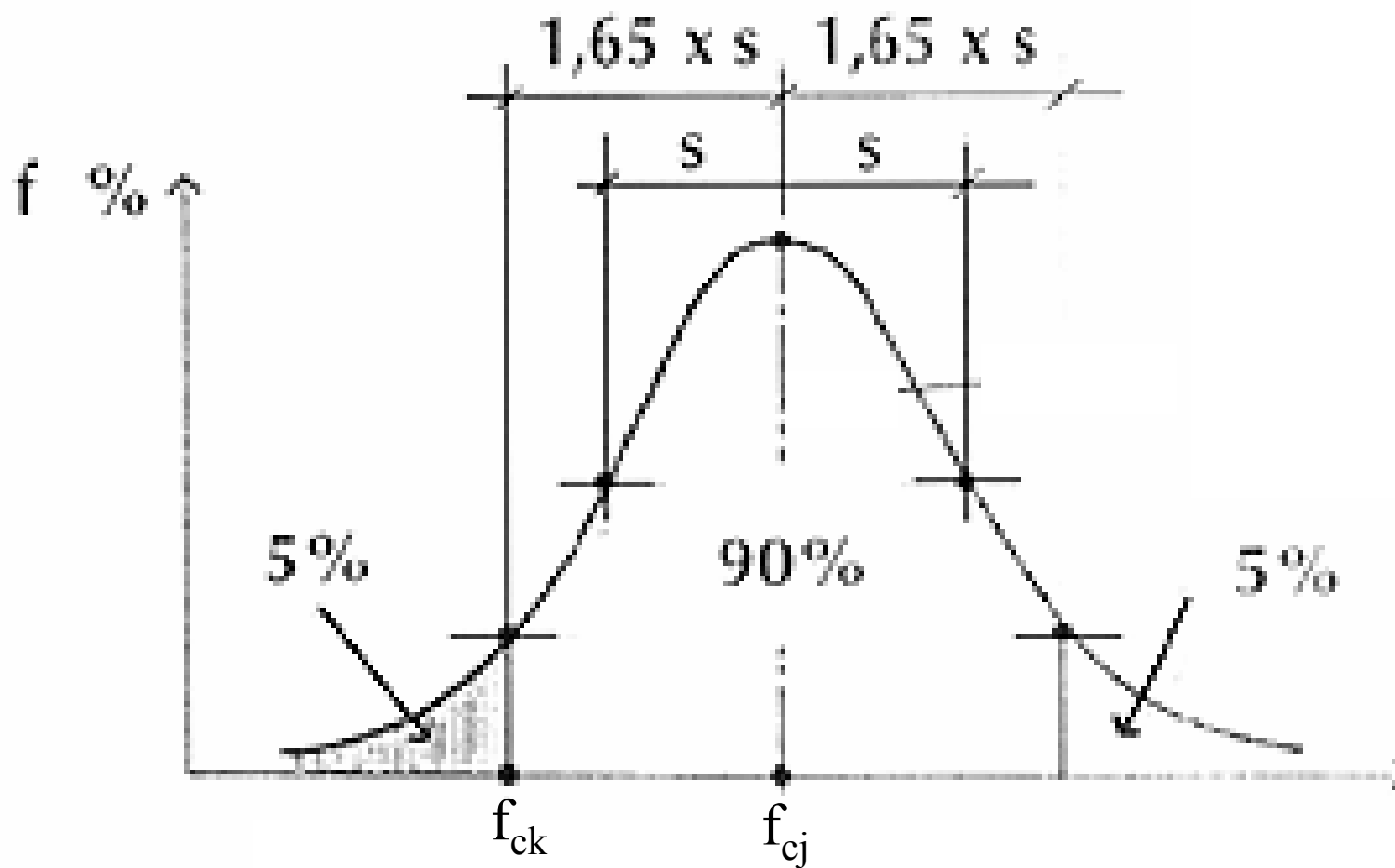


FIG. 3

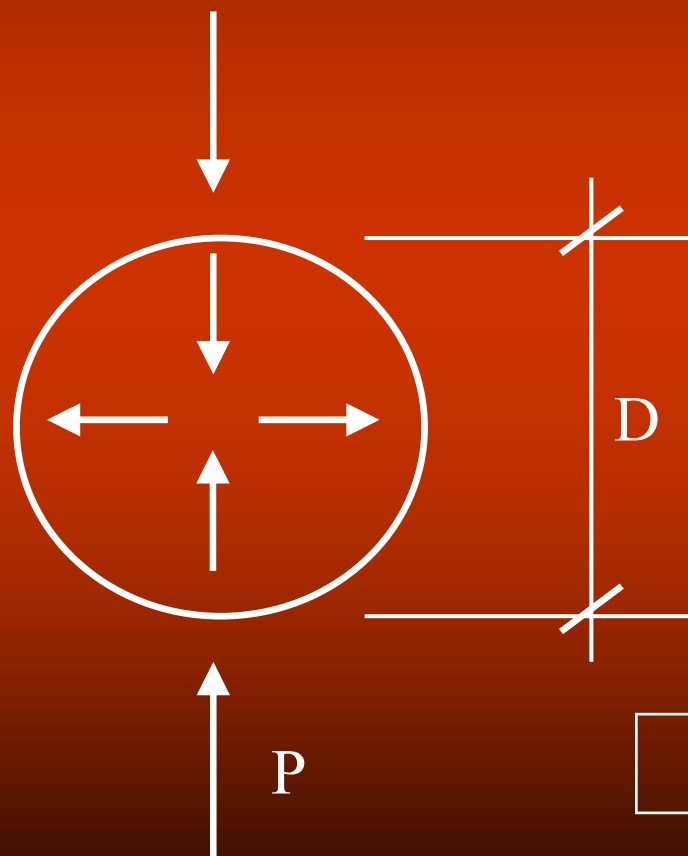


B. Resistência à tração

- Ensaaios
 - Tração direta (f_{ct})
 - Tração na compressão diametral ($f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp}$)
Ensaio Brasileiro – Lobo Carneiro (1943)
 - Tração na flexão ($f_{ct} = 0,7 f_{ct,f}$)



B. Resistência à tração (dureza Brinell)



$$f_t = 2P / (\pi DL)$$



Estabilidade dimensional

- A. Permeabilidade e absorção
- B. Deformações



A. Permeabilidade e absorção

- Poros
 - Retêm água
 - Absorção
 - Comunicação com o exterior
 - Permitem a passagem de água
 - Permeabilidade
 - Filtração
 - Difusão
 - Capilaridade
 - Continuidade dos canais



B. Deformações

Concreto: $\varepsilon \sim 3 \text{ ‰}$

Material elasto-plástico-viscoso

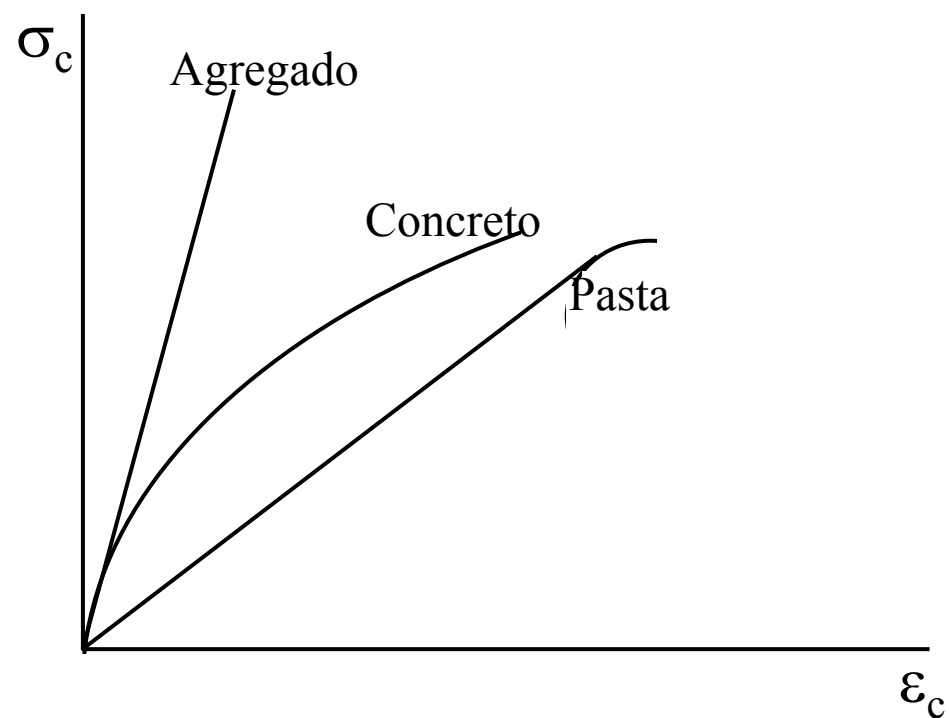


~~Módulo de Elasticidade~~

- Próprias ou intrínsecas
 - Retração
 - Deformação térmica
- Extrínsecas
 - Imediata ou instantânea
 - Lenta



Tensão x Deformação





Evolução da microfissuração interna (percentual da carga última)

< 30%

- fissuras estáveis

30 a 50%

- aumento nas dimensões e quantidade das microfissuras da zona de transição
- desvio da trajetória linear no diagrama tensão x deformação (não-elástico)

50 a 60%

- fissuras na matriz de cimento

60 a 75%

- propagação de fissuras na matriz

> 75%

- tensões elevadas, fissuração contínua



Módulos de deformação

- Módulo de deformação longitudinal
 - Tangente à origem
 - Secante
 - Tangente a um ponto qualquer
- Módulo de deformação dinâmico
- Módulo de deformação transversal



Módulo de deformação longitudinal

Relação entre a tensão aplicada e a deformação, medida no mesmo sentido da carga.

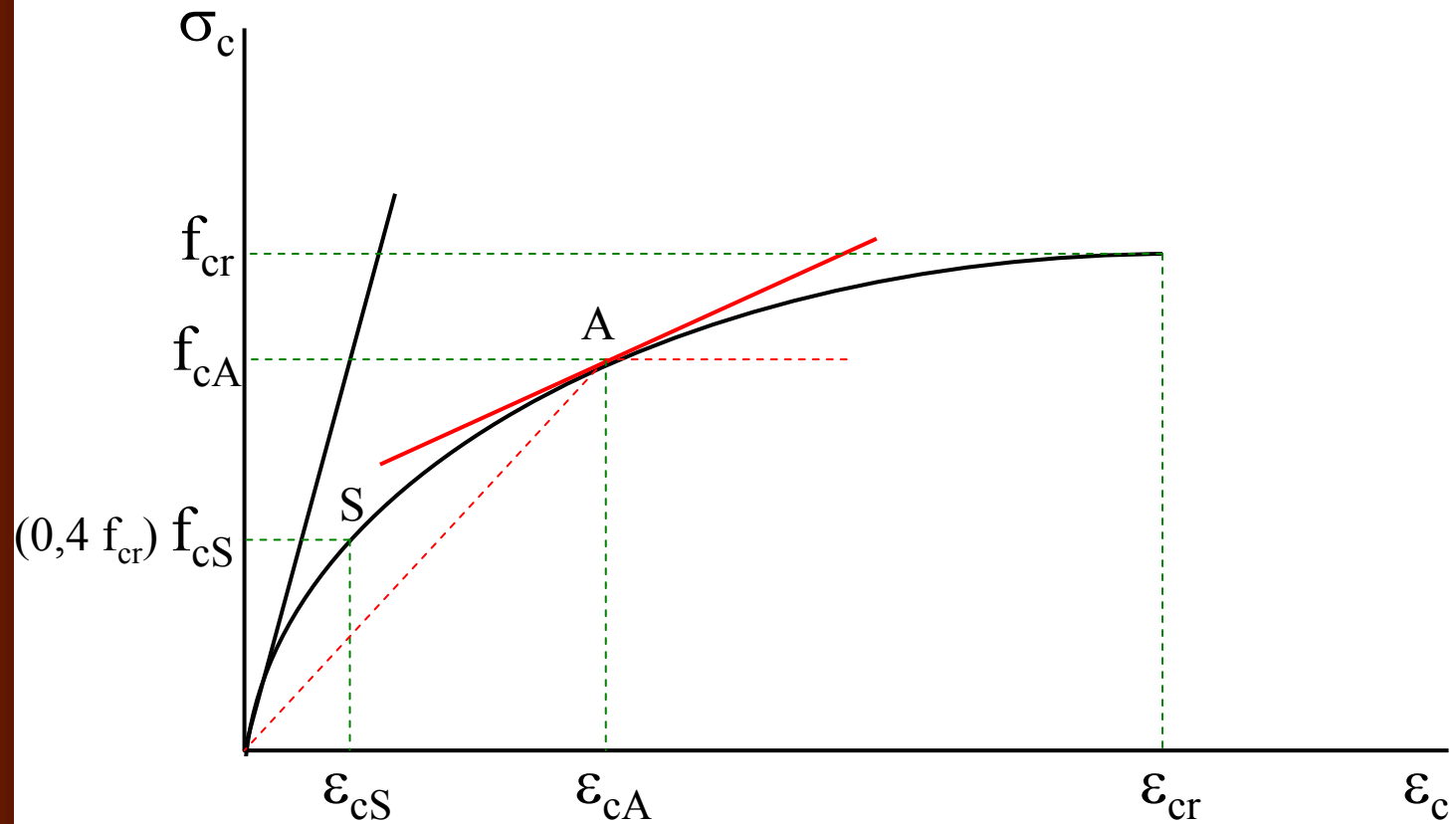
- Tangente à origem: difícil determinação
- Tangente no ponto A: emprego restrito ao cálculo de deformações em estruturas com cargas rapidamente variáveis e de curta duração (ex: pontes ferroviárias)
- Secante: representada pela tangente do ângulo que a secante no ponto considerado forma com as abscissas

$$E_{cA} = f_{cA} / \varepsilon_A$$

É o mais empregado para o cálculo de deformações em estruturas em serviço



Módulos de deformação do concreto





Módulo de deformação longitudinal

NBR 6118:

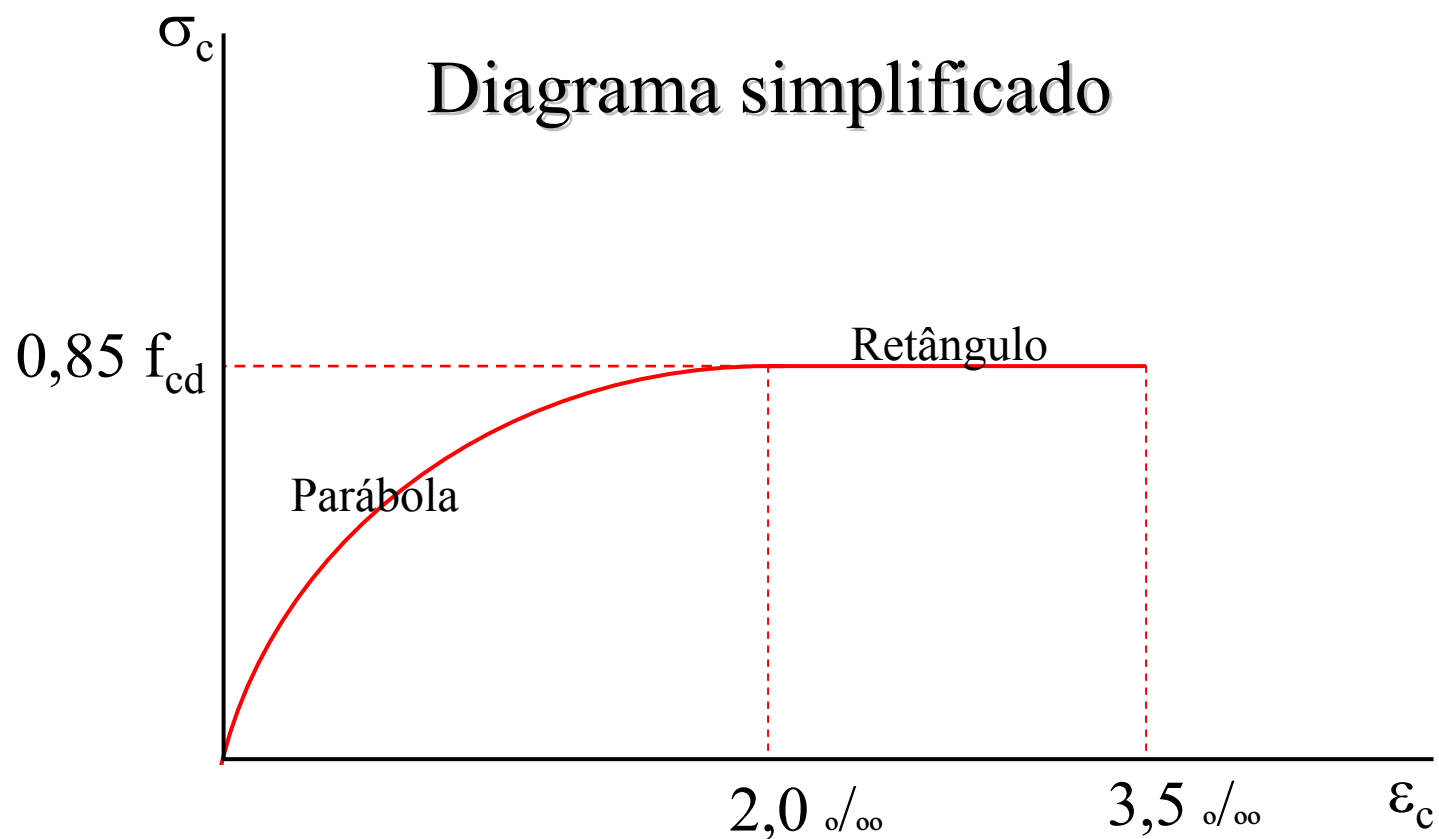
- $E_c = 0,9 \cdot E_{c0} = f_c / \epsilon_c$
- $f_c \leq 0,4 \cdot f_{cr}$

Fatores de influência:

- Relação a/c
- Idade
- Condições de cura
- Agregados
- Umidade do CP no ensaio
- ...



Dimensionamento (cálculos)



$$\sigma_c = 0,85 f_{cd} [1 - (1 - \epsilon_c / 0,002)^2]$$

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c, \quad \text{onde } \gamma_c \sim 1,4$$



Dimensionamento

- Por que $\sigma_{cd} = 0,85 f_{cd}$???

Porque as cargas atuantes na estrutura são de longa duração, enquanto os ensaios são quase instantâneos!

- Por que $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$???

Coeficiente de minoração: considera as diferenças potenciais de resistência entre os corpos-de-prova e a do concreto na estrutura!

Diagrama simplificado não permite o cálculo direto do módulo de deformação!



Outras recomendações (NBR 6118)

- Módulo de deformação longitudinal tangente à origem

$$E_{c0} = 5.600 f_{ck}^{1/2} \quad (\text{MPa})$$

- Módulo de deformação longitudinal secante

$$E_c = 0,9 E_{c0} \quad (\text{MPa})$$

- $f_c \leq 0,4 f_{cr}$



Módulo de deformação dinâmico

Determinado pela propagação de ondas sonoras através do concreto.

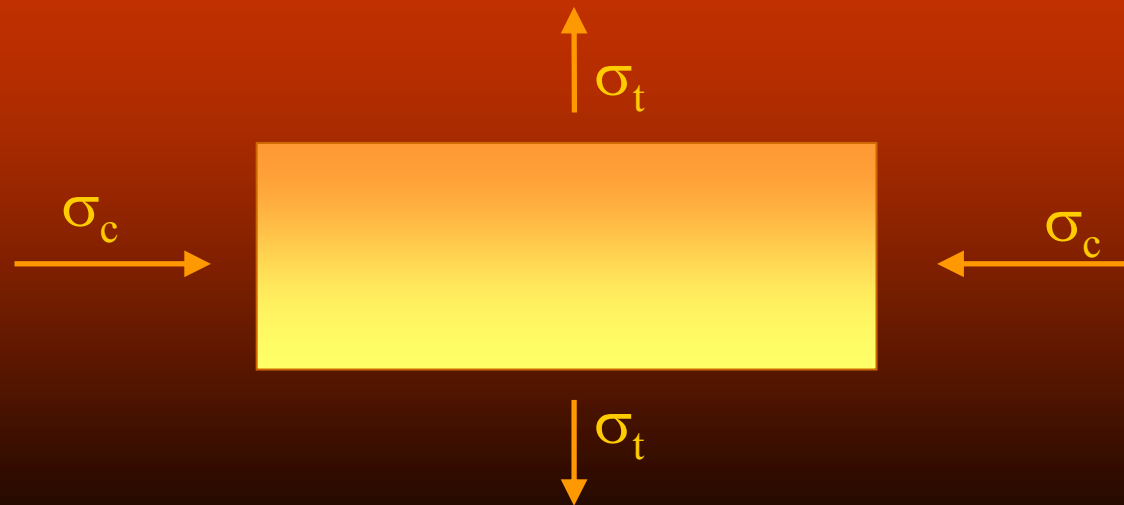
- Ensaio não-destrutivo, “in situ”
- Ensaio estático ($\sim$ módulo tangente à origem)
- Sofre influência das heterogeneidades do meio
- Questionamentos sobre a validade de resultados



Módulo de deformação transversal

Para corpos de prova sujeitos à compressão axial, a relação entre a tensão de tração lateral e a tensão de compressão axial, dentro do domínio estático, é chamada de coeficiente de Poisson.

- Uso: análise estrutural de túneis, reservatórios, lajes...
- NBR 6118: $\nu = 0,20$





B1. Deformações intrínsecas

a) Expansão

Quando temos cura submersa

Pasta pura: 1 a 2 mm/m

Concreto (300 kg/m³) = 0,10 a 0,15 mm/m

Ocorre com acréscimo de massa de 1%

Água entra para ocupar espaço que surge devido à redução de volume da hidratação do cimento (contração química).



B1. Deformações intrínsecas

b) Retração do concreto fresco

~ 1% do volume do cimento seco

✓ Sedimentação

assentamento devido ação da gravidade

gera fissuras (armaduras e agregados)

ocorre 1 a 2 h após lançamento

✓ Retração plástica

rápida fuga de água das camadas superficiais do concreto (evaporação, absorção pelas formas e agregados)

gera fissuras com até 1 m de profundidade e 0,1 a 0,3 mm de largura

ocorre 1 a 3 h após o lançamento e pode atingir 1 a 20 mm/m



B1. Deformações intrínsecas

c) Retração do concreto endurecido

- ✓ **Química ou autógena:** contração da água combinada quimicamente com o cimento (variação: 0,01 a 0,15 mm/m)

valor final: $\frac{1}{4}$ da retração hidráulica

- ✓ **Hidráulica ou por secagem:** equilíbrio de umidade com o meio (umidade relativa), perda de umidade

~ 0,5 mm/m para um concreto simples

- ✓ **Por carbonatação:** decorrente da ação de CO_2 na pasta hidratada - Ca(OH)_2 , função do tempo, muito lenta



Retrações

- Ação conjunta
 - Fissuras

Cálculo da retração: fórmulas complexas

NBR 6118

- Retração total para o concreto armado:
 $\varepsilon_{cs} \sim 15 \cdot 10^{-5}$ ou 0,15 mm/m



Retração – *valores típicos*

	Cimento (kg/m ³)	a/c	Retração (x10 ⁻⁵)
Pasta	1800	0,25	220
Argamassa	550	0,50	90
Concreto	450	0,30	20
Concreto	450	0,50	80
Concreto	450	0,70	140
Concreto	250	0,30	5
Concreto	250	0,50	20
Concreto	250	0,70	40



Agregados



Relação a/c, consumo de cimento



B1. Deformações intrínsecas

d) Deformações térmicas

Origem

✓ Externa

variação no ambiente

retração diferencial (movimentação)

✓ Interna

calor de hidratação (grandes peças)

baixo coeficiente de condutibilidade térmica ($0,1 \text{ mm/m/}^{\circ}\text{C}$)



B2. Deformações extrínsecas

$\sigma_c \leq 0,4 f_{cr}$: condição de segurança

$f_{cr} < \sigma_c \leq 0,8 f_{cr}$: ruptura sob carga lenta

$\sigma_c > 0,8 f_{cr}$: ruptura rápida

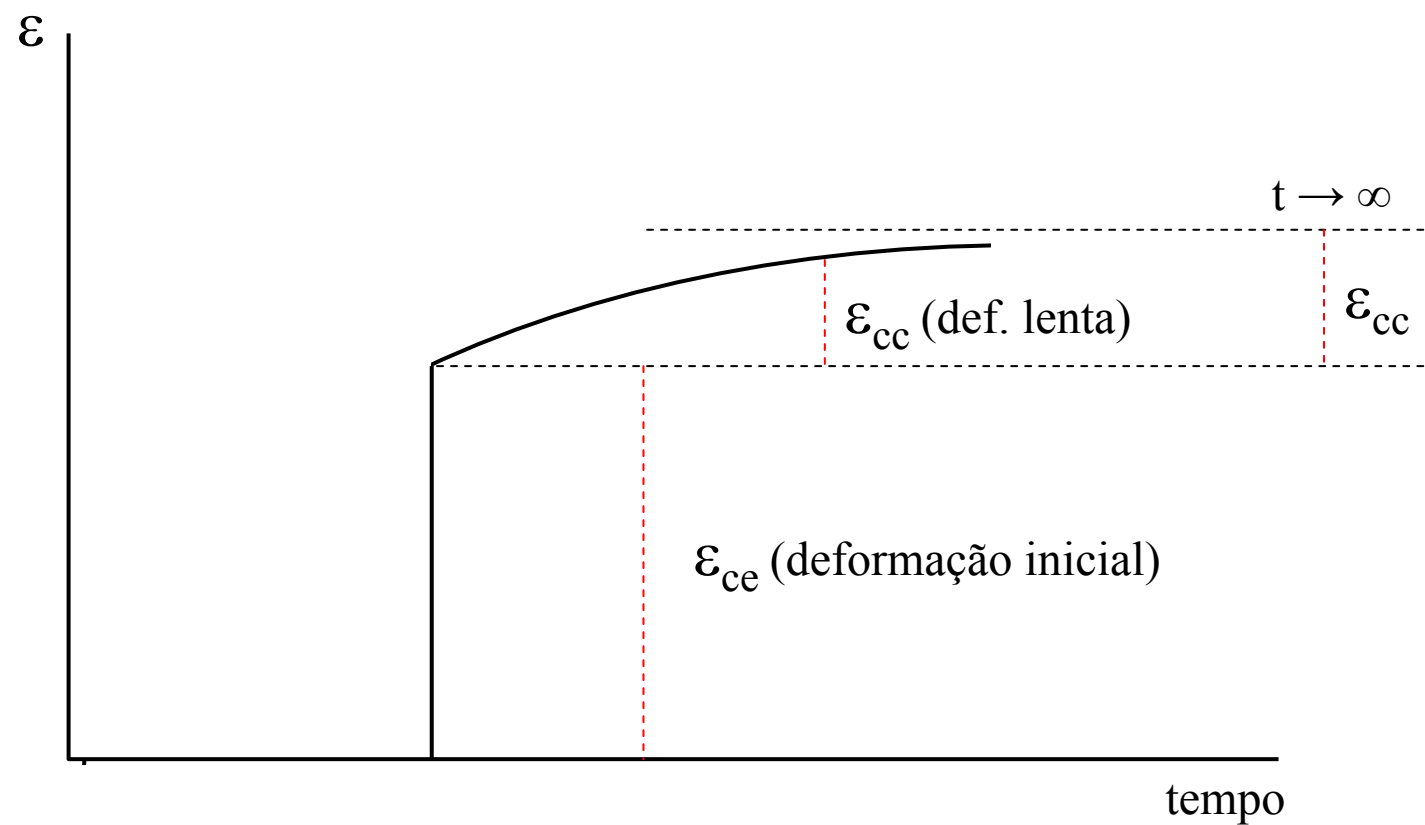
Ruptura sob ação de carga se dá devido à propagação de microfissuras!



Deformação sob carga

ϵ_{ce} : concrete, elastic

ϵ_{cc} : concrete, creep (fluência)





Fluência

Concreto é um material viscoso, logo, apresenta aumento de deformação com o tempo, sob carregamento constante!

- *Básica*
 - *Movimentação da água do gel*
- *Por secagem*
 - *Retração*
 - *Baixa umidade relativa no ambiente*

$$\text{Fluência Total} = \text{Fl. Básica} + \text{Fl. por Secagem}$$



Fluência – *fatores de influência*

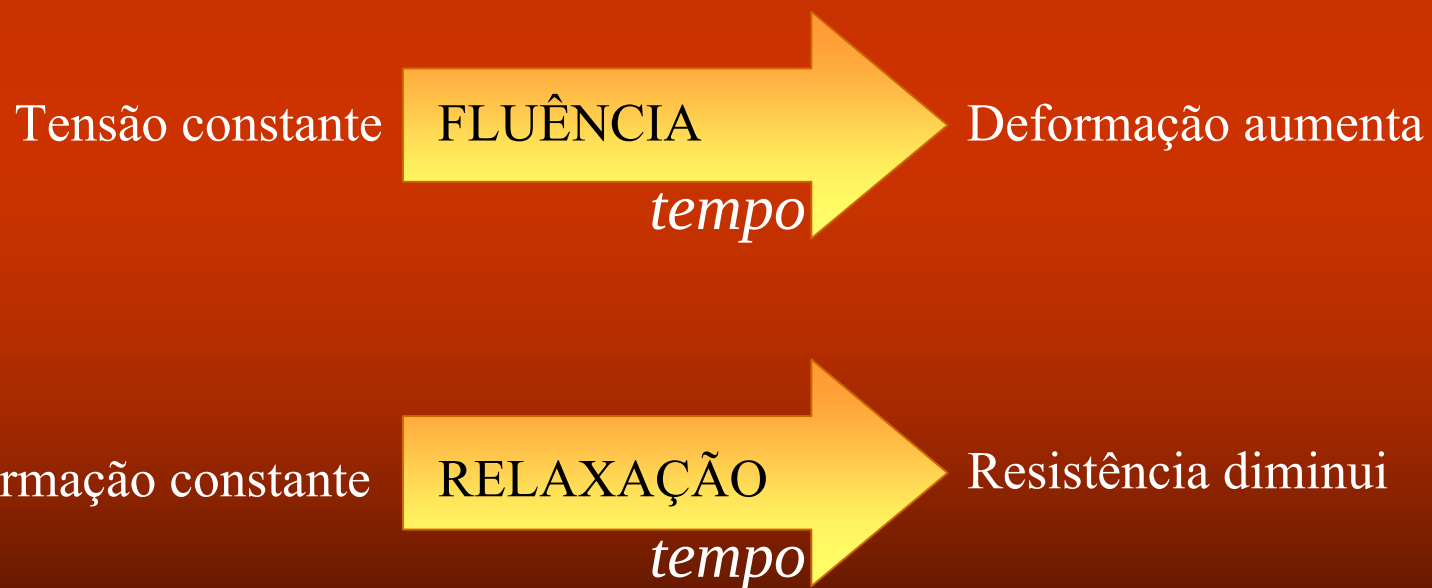
- **Composição do concreto**
 - Pasta: maior responsável
 - Agregado: restrição
 - Tipo e finura do cimento
 - Relação a/c: migração da água evaporável e resistência
- **Condições ambientais**
 - Equilíbrio higroscópico (umidade relativa, cura)
 - Temperatura

Ex: fluência a 70°C é 3,5 vezes maior do que a 21°C



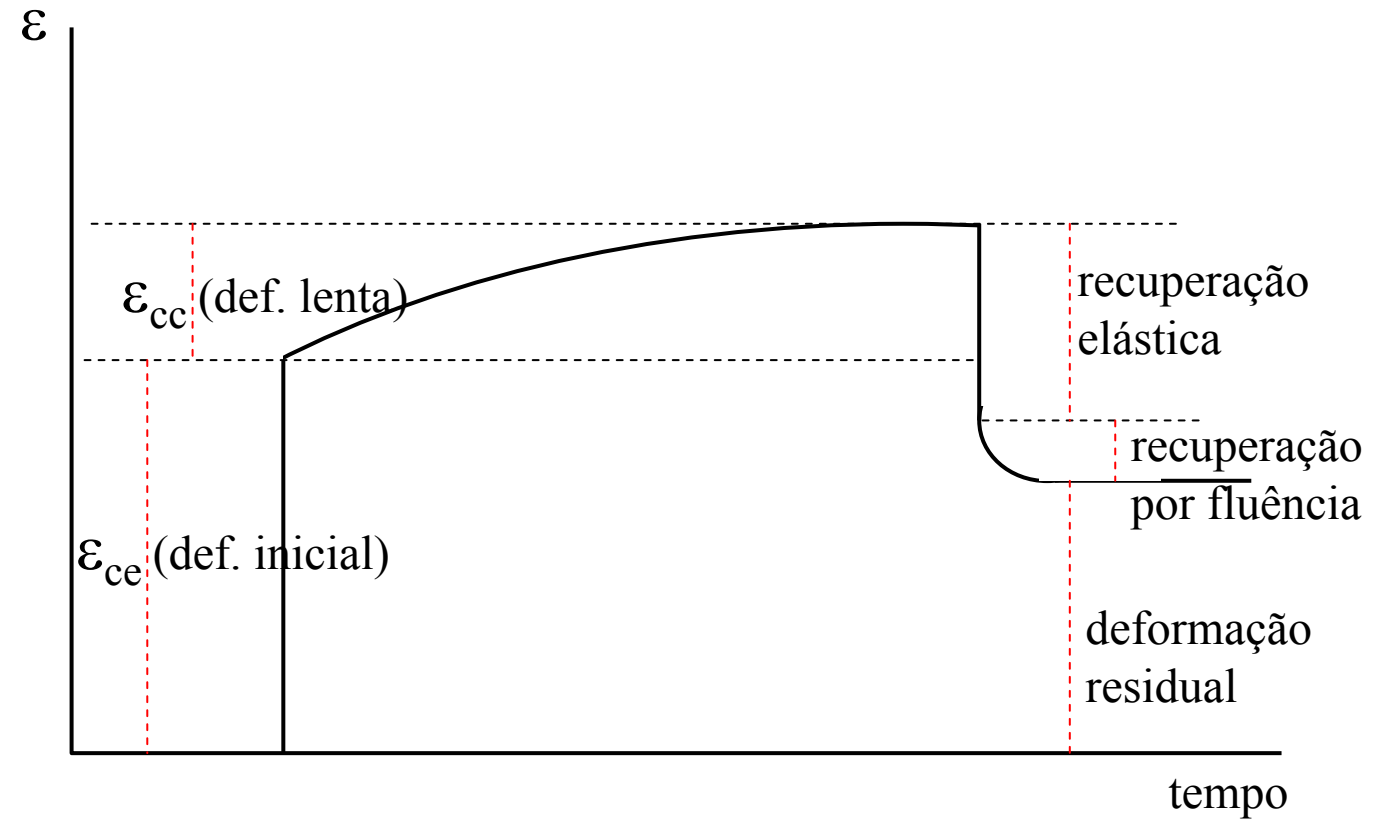
Fluência x Relaxação

Em estruturas de concreto onde há restrição à deformação (deformação imposta), a fluência apresentará um decréscimo da tensão com o tempo!





Reversibilidade





Fluência e relaxação – *efeitos*

- Perda de protensão ao longo do tempo em peças de concreto protendido (previsão no cálculo)
- Ocorrência de flechas provocam fissuração de elementos de vedação e revestimentos
- Transferência de tensões do concreto para o aço em peças comprimidas de concreto armado
- Perda de rigidez sob ação de carga constante – efeito Rüşh ($0,85 f_{cd}$)