



Ministério da Educação
Universidade Federal do Paraná
Setor de Tecnologia
Departamento de Construção Civil

Materiais de Construção II **(TC-031)**

REOLOGIA

Professores

José Marques Filho - jmarques@ufpr.br

José de Almendra Freitas Jr. - freitasjose@terra.com.br

Marienne do Rocio Maron da Costa - mariennemaron@gmail.com

Laila Valduga Artigas - artigas@ufpr.br

Versão 2020

Mecânica dos Sólidos Deformáveis:

A **Mecânica dos Sólidos Rígidos** estuda o movimento dos corpos supondo-os indeformáveis, hipótese não real mas que permite a solução de um grande número de problemas de Engenharia.

A **Mecânica dos Sólidos Deformáveis** é essencial quando o problema é o da definição das características geométricas e mecânicas de um sólido que deva resistir a determinados esforços. Nestes casos a consideração da deformação do sólido e dos esforços no seu interior é fundamental.

Mecânica dos Sólidos Deformáveis:

Estuda a situação genérica de solicitação de um sólido:

- **Análise das Ações:** as influências que o corpo estudado sofre, oriundas de outros corpos;
- **Análise das Tensões:** define os esforços que aparecem no interior do sólido;
- **Análise das Deformações:** estudo geométrico das variações das distâncias entre os diversos pontos do sólido;
- **Reologia:** analisa, para cada material, as relações entre os esforços internos e as correspondentes deformações, bem como os esforços internos que um material é ou não é capaz de suportar.

Análise das Estruturas:

Para determinação dos esforços em estruturas hiperestáticas é necessária a utilização da

Mecânica dos Sólidos Deformáveis.

Precisa-se conhecer o quanto os materiais se deformam quando expostos a determinadas tensões.

O edifício Mandarin, SP, estrutura monitorada nas primeiras idades de carregamento para se controlar as deformações lentas.



Análise das Estruturas:

Conhecendo os esforços nos elementos estruturais e o comportamento dos materiais quanto a tensões e as deformações, pode-se dimensionar adequadamente os elementos da estrutura.



Importância da análise das deformações dos materiais em estruturas complexas e arrojadas.

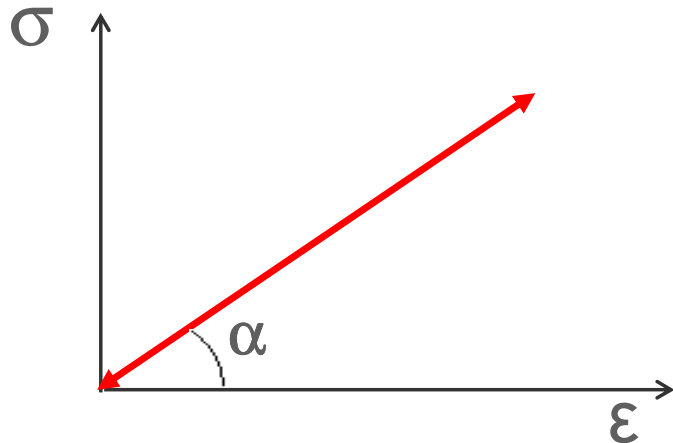
Palácio Tiradentes, Belo Horizonte, 310 mil m², custo R\$ 1,2 bilhão

Proj. arquitetônico: Oscar Niemeyer, Proj. estrutural: José Carlos Sussekind

Análise das Estruturas:

As técnicas mais usuais para determinação dos esforços utilizando a **Mecânica dos Sólidos Deformáveis**, faz uma simplificação do comportamento de deformações dos materiais, utilizando somente o Módulo de Elasticidade (E).

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \sigma / \varepsilon$$



E = Módulo de deformação linear ou módulo de elasticidade.



Considera somente deformações elásticas de comportamento linear.

Análise das Estruturas:

As análise estrutural utilizando somente o **Módulo de elasticidade** produz muitos resultados excelentes.

Para alguns tipos de estruturas ou análises mais complexas, se fazem necessárias equações mais realistas que também representem o comportamento não linear e plástico dos materiais.

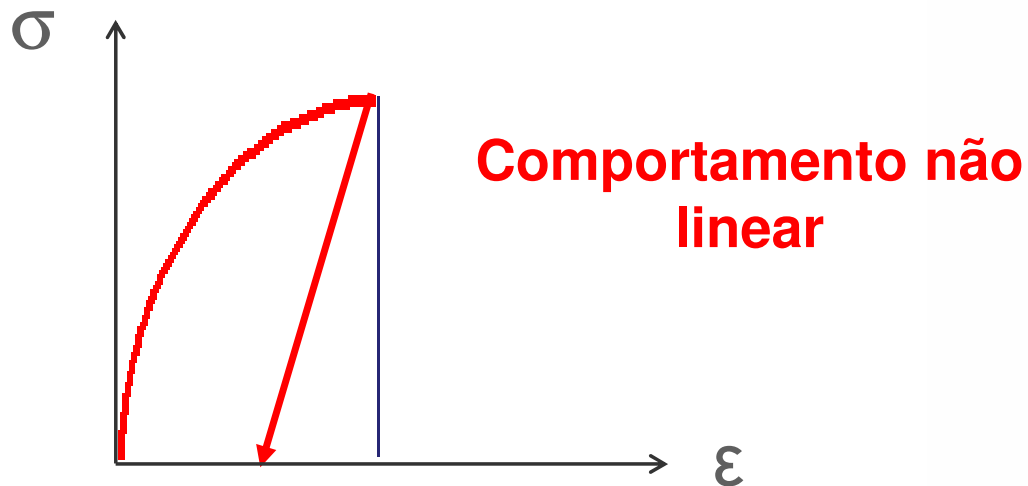
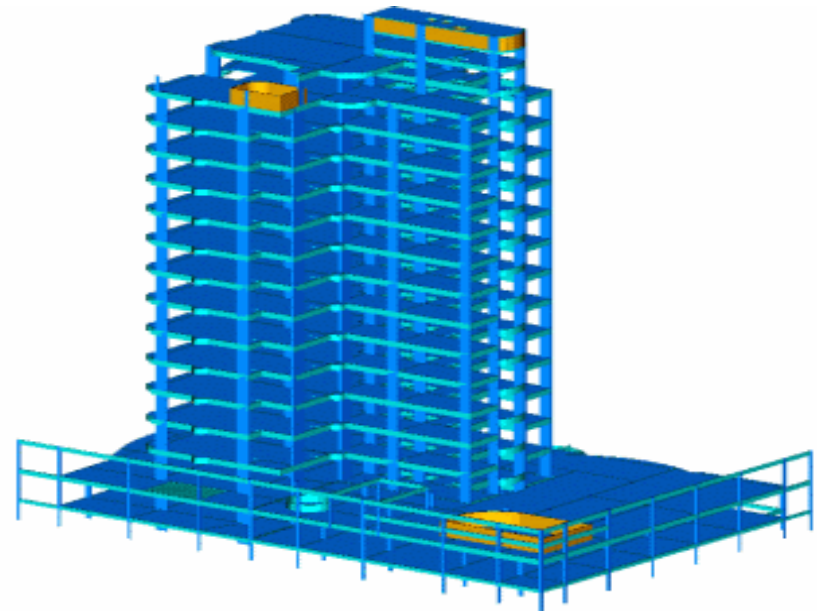


Diagrama tensão x deformação de concreto



Análise das Estruturas:

Análises mais complexas são possíveis através de métodos numéricos de elementos finitos utilizando equações que representem um comportamento mais realista das tensões e deformações dos materiais.

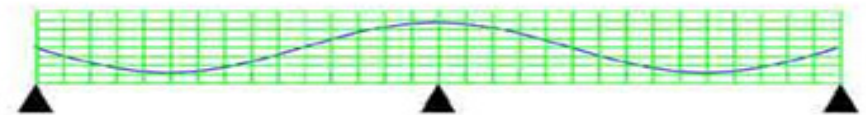
Viaduto de Milau quando do lançamento do tabuleiro



http://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Millau_Viaduct

Viga protendida

Malha do concreto com o cabo de protensão

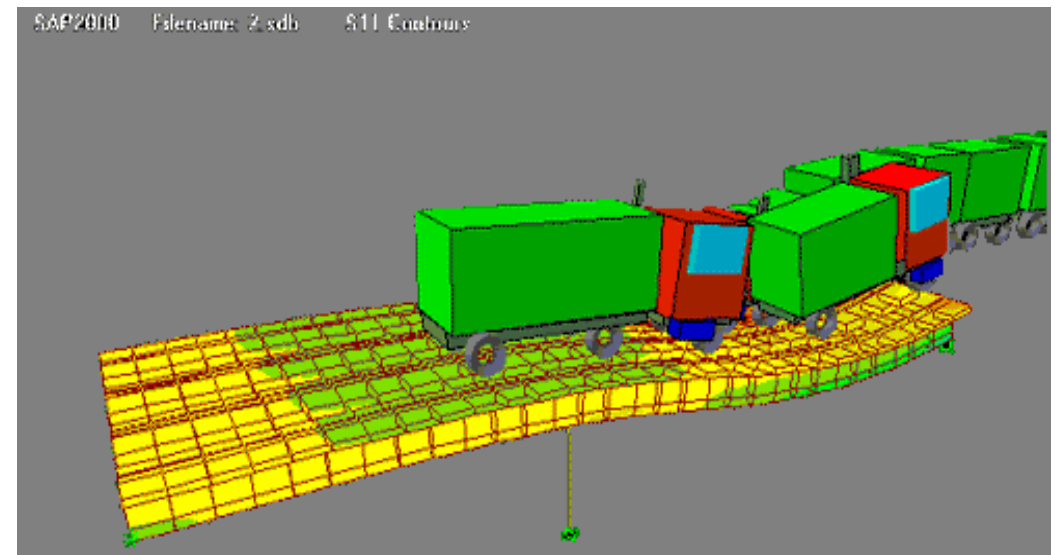
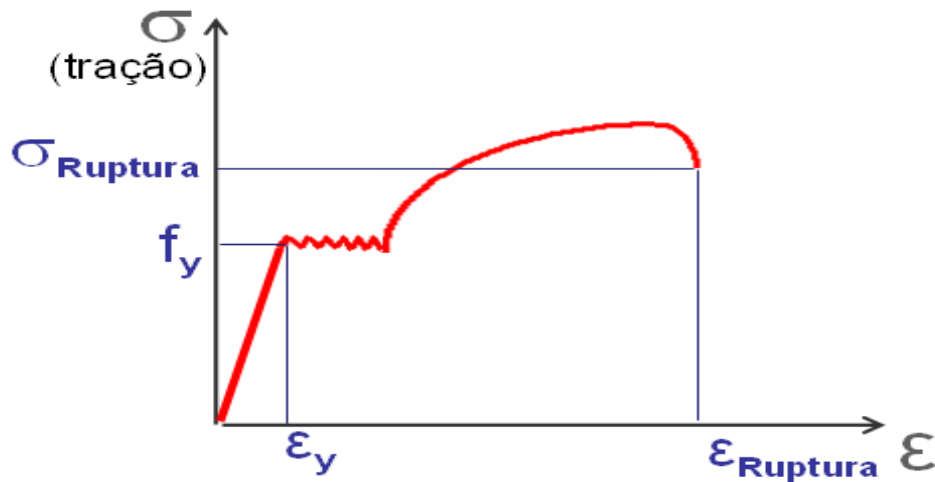


Deformada vista no plano



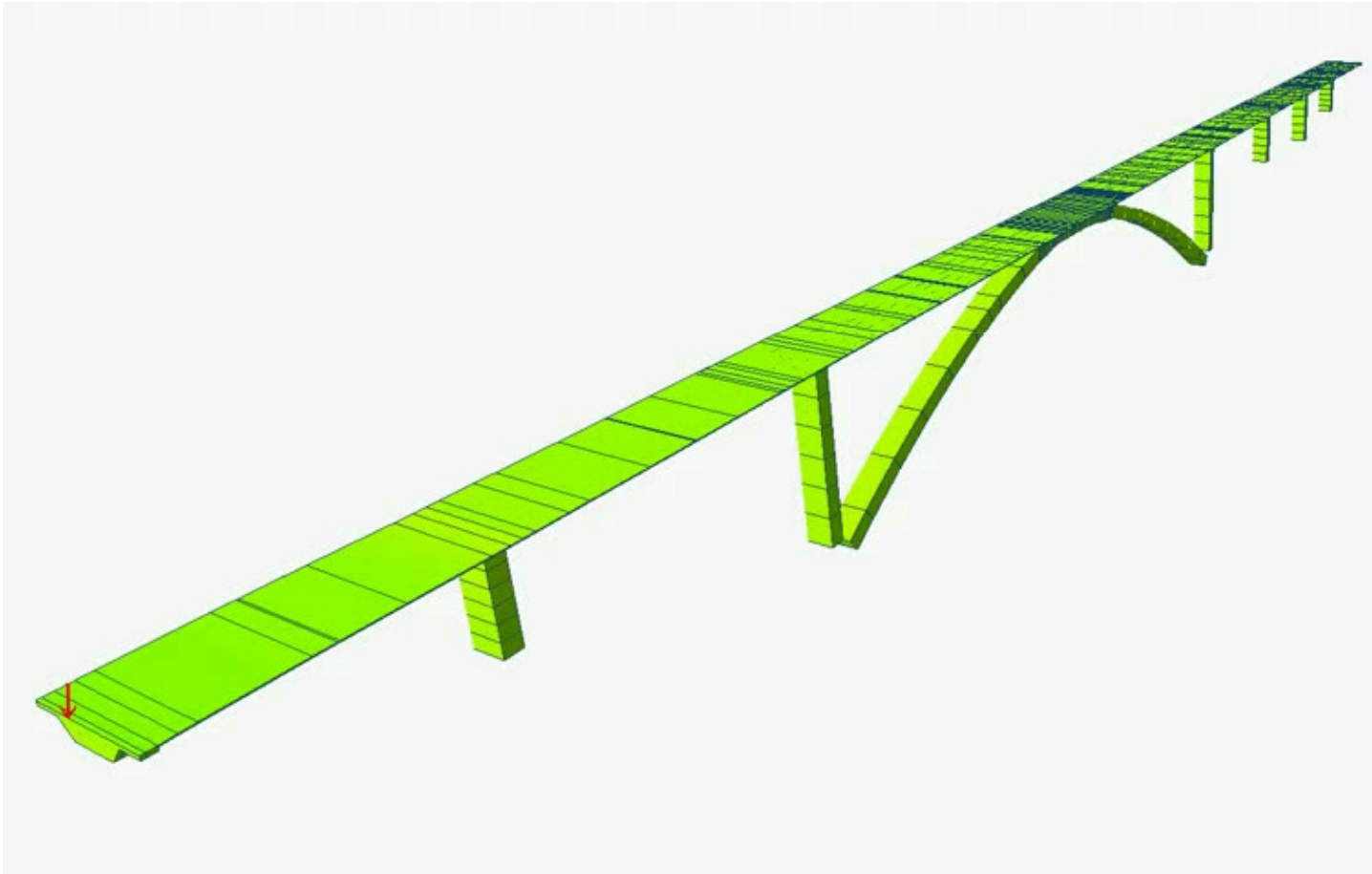
Análise das Estruturas:

Com as equações que representem um comportamento mais complexo e mais próximo da realidade dos materiais, são possíveis análises estruturais que considerem esforços de 2ª ordem, (devido a mudança geométrica do elemento estrutural decorrente da deformação), assim como as deformações plásticas e até a eventual ruptura dos materiais.



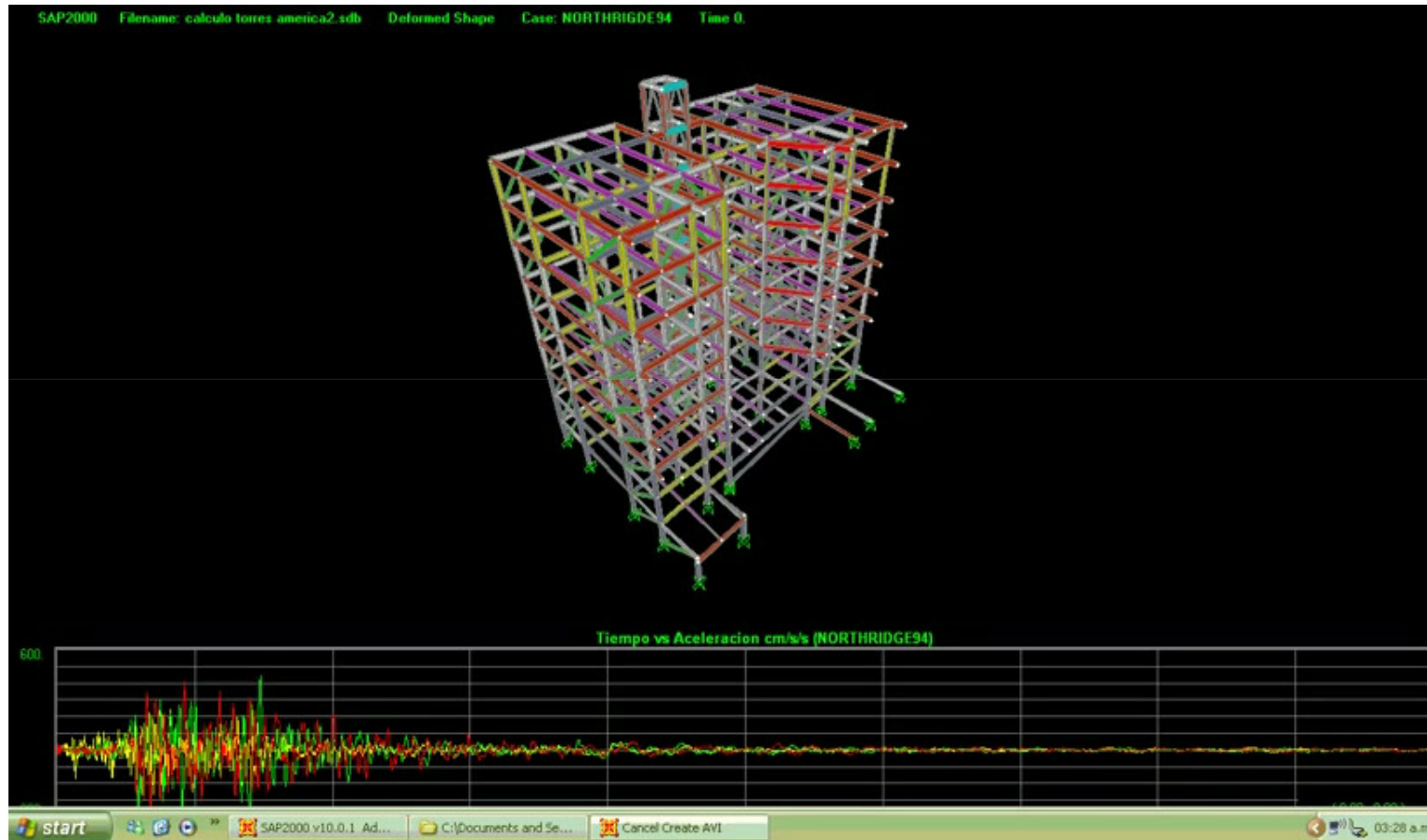
Análise de estruturas

Permite estimar as deformações e tensões



Arquivo: Filmes concreto / Elementos finitos / Estruturas deformadas

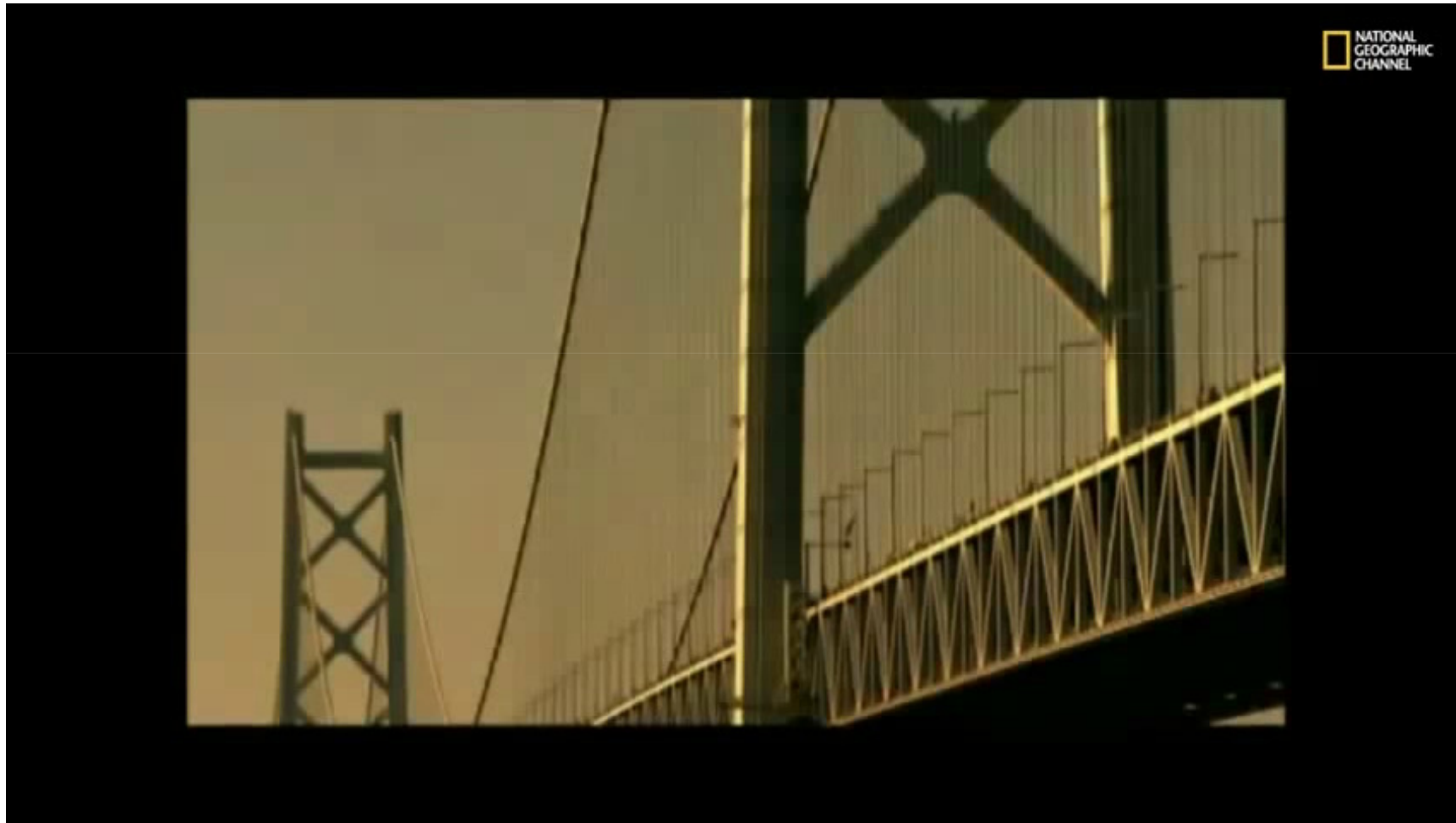
Análise de estruturas – simulação de terremotos



(Terremoto de Northridge, California, EUA, 1994)

Arquivo: Filmes concreto / Elementos finitos / Simulação terremoto

Trem teste – Ponte Akashi Kaikyo - Japão



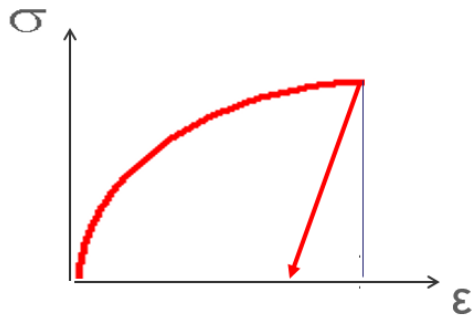
Arquivo: Filmes concreto / Pontes / Deformação ponte Akashi-Kaikyo

Análise das Estruturas:

Os materiais chegam à **ruptura pelo acúmulo das deformações**, imediatas, lentas, elásticas ou plásticas.

Concreto:

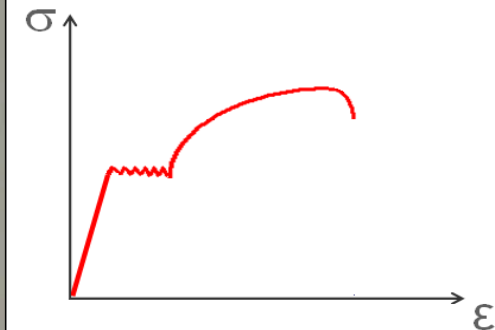
Podemos considerar tecnicamente rompido quando acumula 0,3% de deformação.



Aço para concreto:

Consideramos que a partir de 0,2% de deformação se inicia o escoamento plástico que leva à deformações muito grandes e a ruptura.

Aço:
Deformações
elásticas,
plásticas e
ruptura



Tacoma Narrows Bridge

A importância
de se manter as
deformações
dentro do
campo elástico



Arquivo: Filmes concreto / Pontes / Tacoma Narrows Bridge Collapse

***Estádio de
futebol na
Argentina***

A importância
de se manter as
deformações
dentro do
campo elástico

DEFORMAÇÕES
IMEDIATAS

MARQUE SEU AMIGO

ENGENHEIRO ESTRUTURAL

***Estádio de futebol
em Curitiba***



A importância
de se manter as
deformações
dentro do
campo elástico

DEFORMAÇÕES
IMEDIATAS

**Edifício em
Balneário
Camboriú**



A importância
de se manter as
deformações
dentro do
campo elástico

DEFORMAÇÕES
IMEDIATAS

Ponte Rio-Niteroi

A importância
de se manter
as
deformações
dentro do
campo elástico

DEFORMAÇÕES
IMEDIATAS



London Millenium Bridge

Condições de
carregamento
imprevistas!



Park Avenue 432 - NY

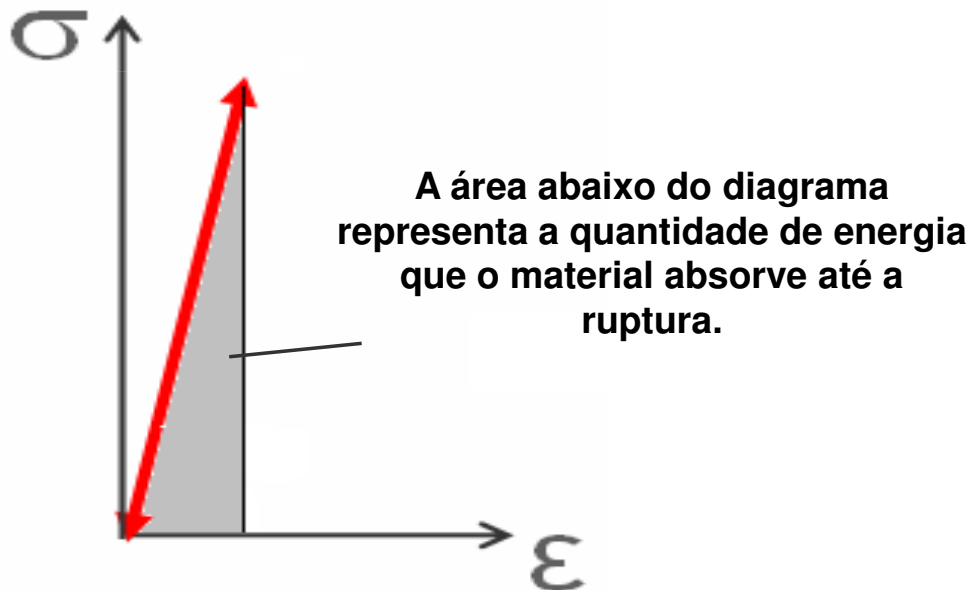


A importância de se manter
as deformações dentro do
campo elástico



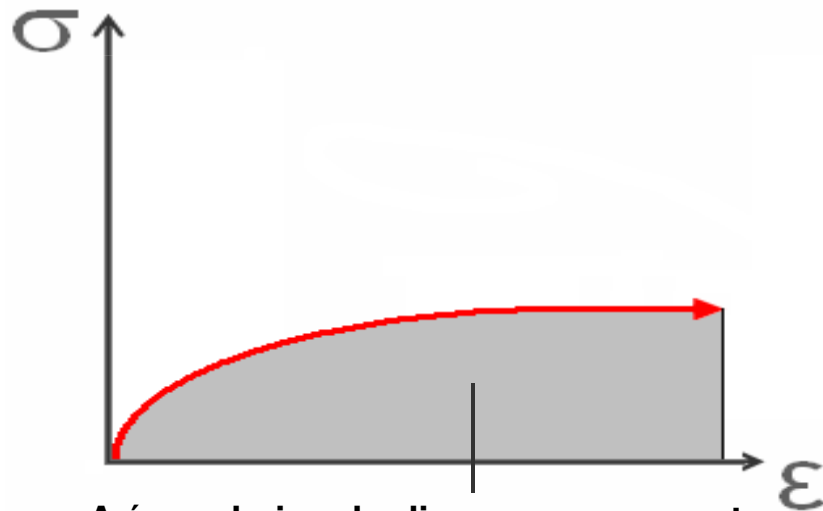
Definições:

Material Frágil = Pouco se deforma antes da ruptura.
 Obedece a Lei de Hooke até a ruptura.
 Ex. : ferro fundido, concreto e vidro plano.

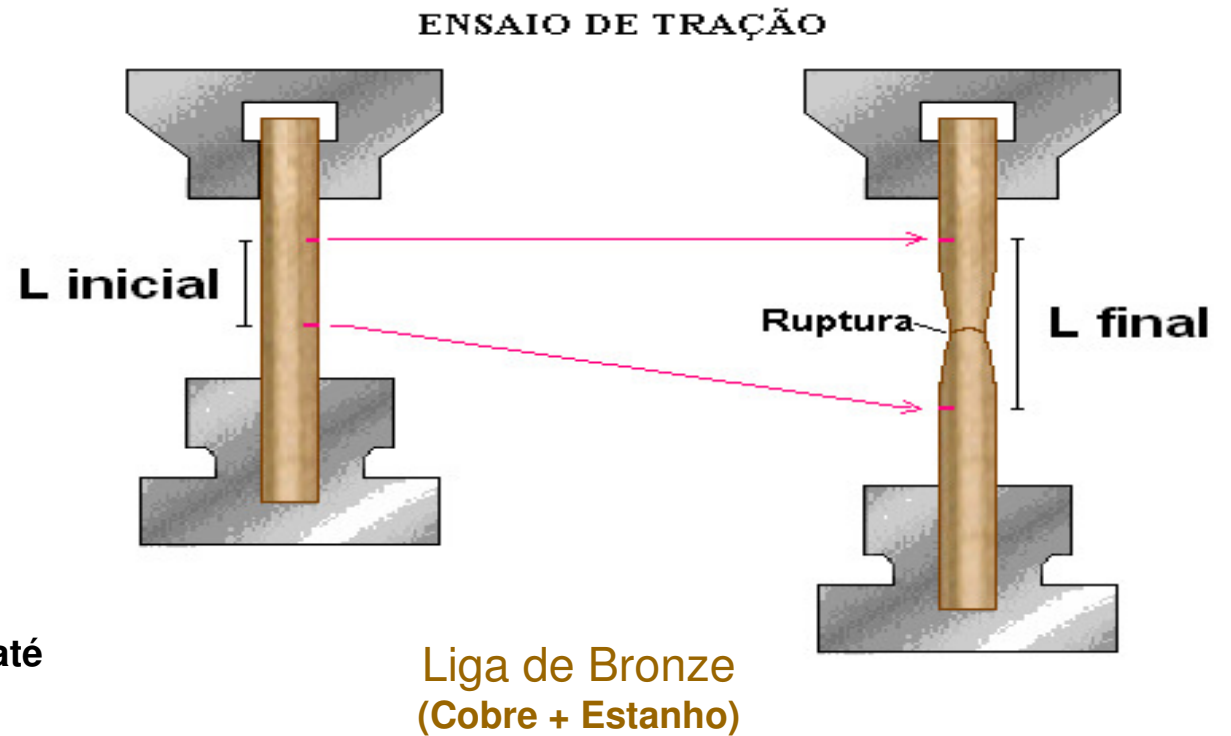


Definições:

Material Dúctil = Sofre grandes deformações antes da ruptura. .
 Ex. : aço com baixo teor de carbono, polímeros.



A área abaixo do diagrama representa a quantidade de energia que o material absorve até a ruptura.



Análise das Tensões :

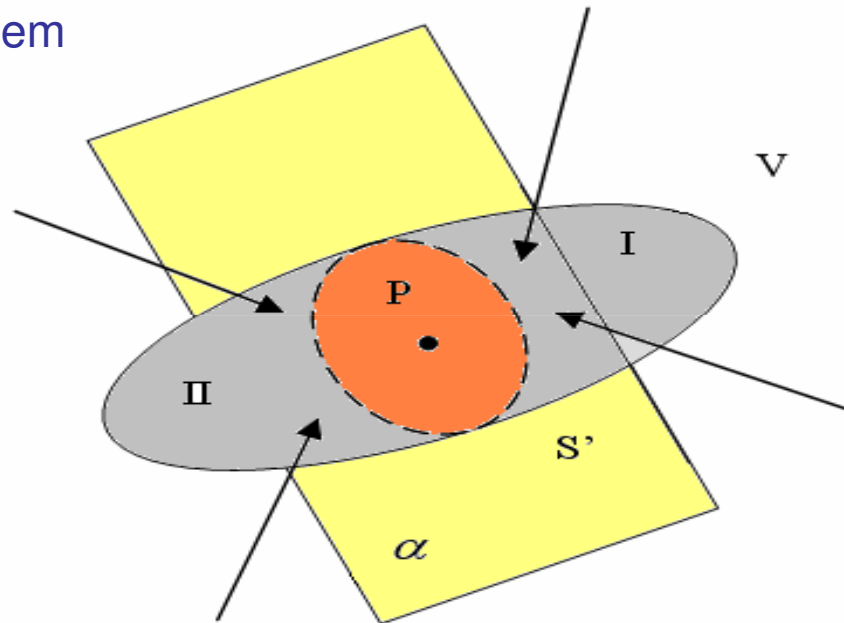
1) Sólido V , sujeito à esforços externos, em equilíbrio

2) P - ponto no interior de V

3) α - plano contendo P

4) S' , interseção de α com V

5) I e II - partes que V é dividido por S'



Estando V em equilíbrio, partes I e II também devem estar em equilíbrio.

Como os esforços externos que agem em I não estão equilibrados, evidencia-se a existência de esforços transmitidos de II para I, através de S' , que estabeleçam o equilíbrio de I.

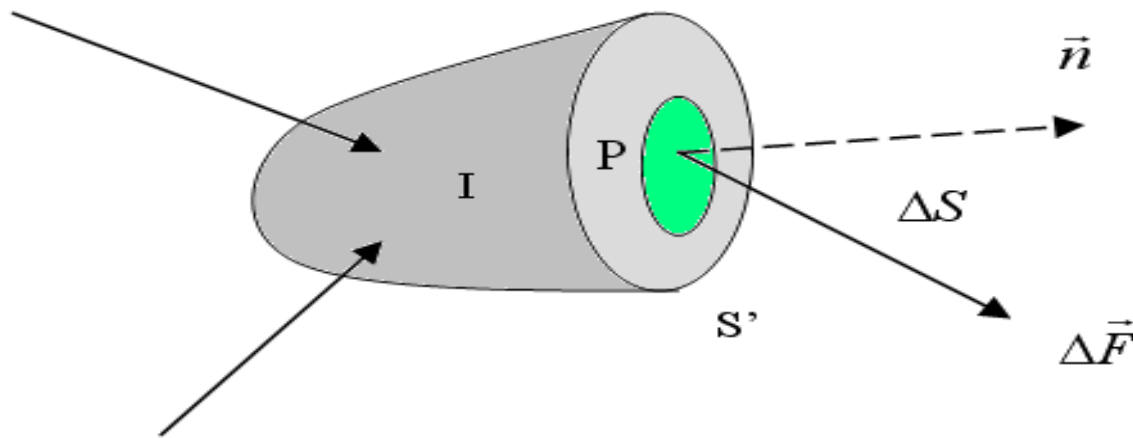
Tais esforços, recebem a denominação de esforços internos.

Análise das Tensões :

Seja ΔS uma superfície em α e contendo P , e seja $\Delta \vec{F}$ a força transmitida de $\vec{\Pi}$ para I através de ΔS .

Define-se a grandeza $\vec{\rho} = \Delta \vec{F} / \Delta S$ para o mesmo sólido e para os mesmos esforços externos.

$\vec{\rho}$ varia com P , α e ΔS e denomina-se de tensão média em P , no plano α e na área ΔS .

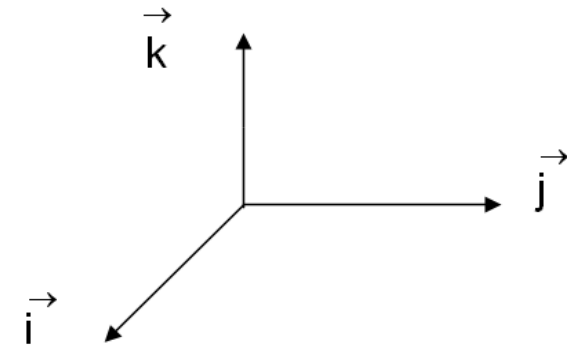
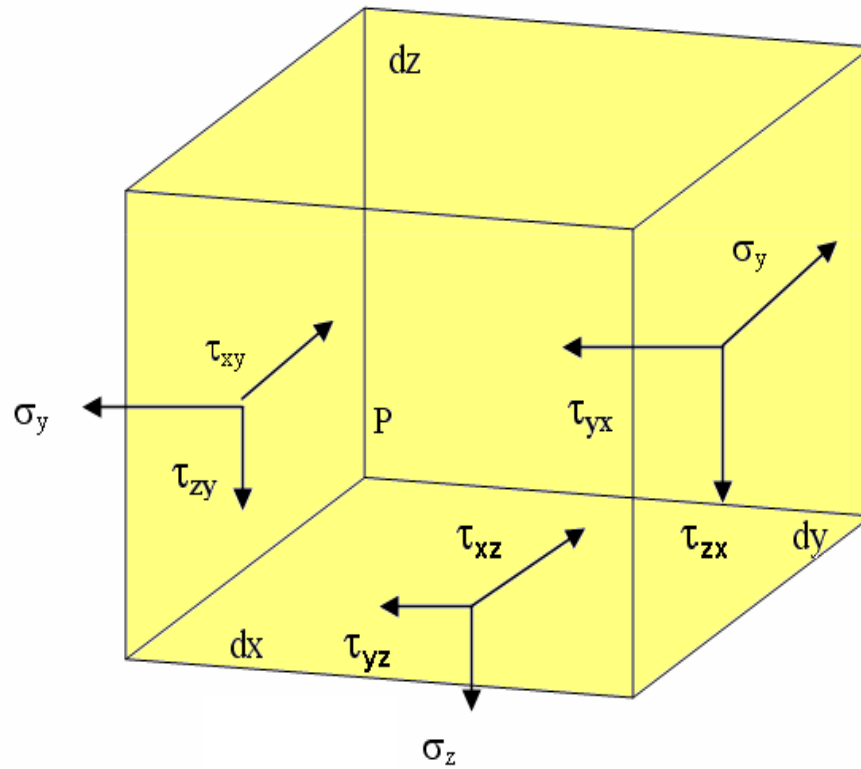


$$\vec{\rho} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \vec{\rho}_m = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{F}}{\Delta S}$$

$$\vec{\rho} = \vec{\rho}(P, \alpha)$$

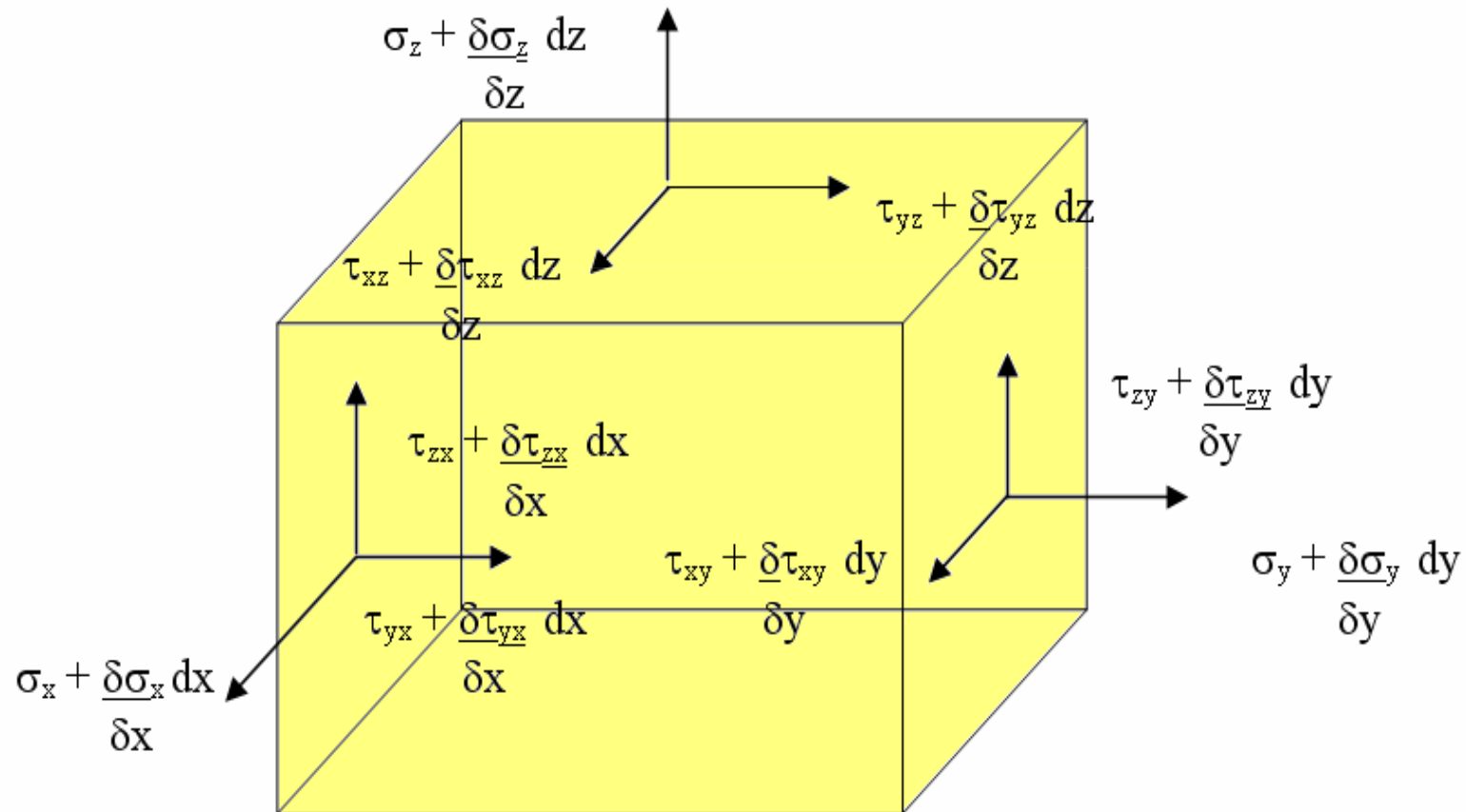
Análise das Tensões :

Tensões em um ponto P



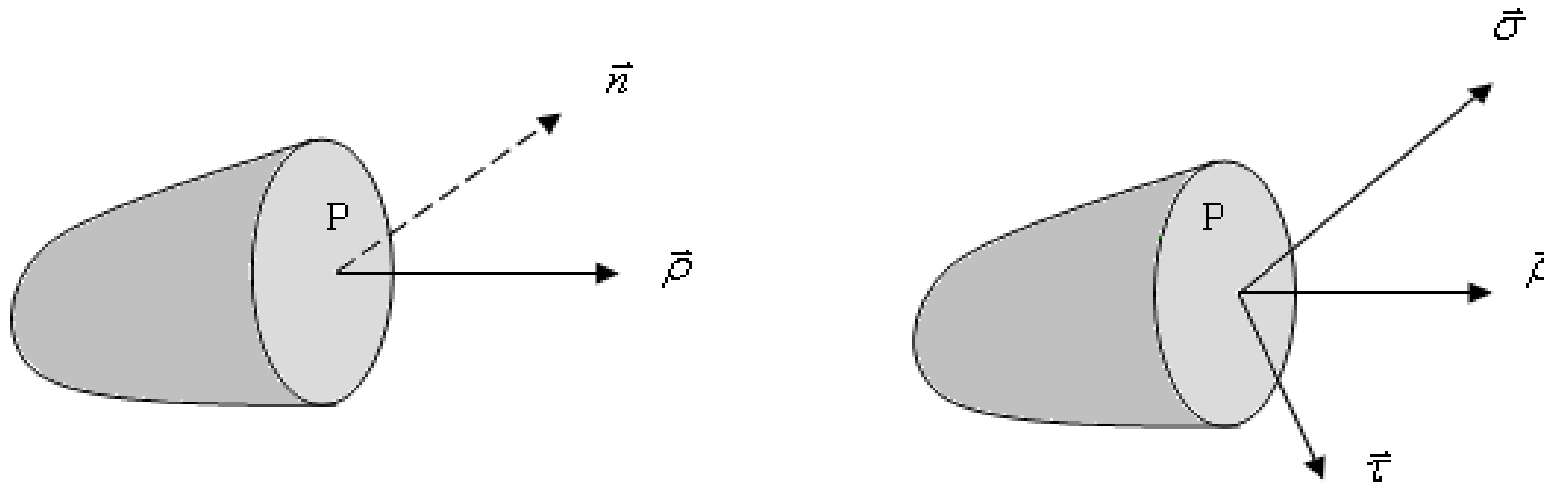
Análise das Tensões :

Tensões em um ponto P



Análise das Tensões :

$\vec{\rho}$ não possui a direção de $\vec{\eta}$ assim, é conveniente que seja feita sua decomposição, unívoca, em dois vetores, $\vec{\tau}$ com a direção de $\vec{\eta}$, e pertencente a α .



$$\vec{\rho} = \vec{\sigma} + \vec{\tau}$$

REOLOGIA:

É a parte da ciência dos materiais que estuda o comportamento físico estrutural intrínseco da matéria.

Estuda o material, sem necessidade do conhecimento da forma dos corpos envolvidos.

Em cada sólido estudado são definidos três campos :

- Deslocamentos;
- Tensões e
- Deformações.

A Reologia baseia-se no estudo das deformações.

REOLOGIA:

As **DEFORMAÇÕES** podem ser:

a) **IMEDIATAS**

Ocorrem simultaneamente à tensão que as causou.

b) **LENTAS ou VISCOSAS** (não imediatas)

Ocorrem muito mais lentamente, muito depois da aplicação da tensão que as origina.

Iniciam imediatamente com a aplicação da tensão mas desenvolvem-se de forma vagarosa.

Podem se desenvolver por minutos ou anos...

As **DEFORMAÇÕES** imediatas e lentas podem ser:

a) ELÁSTICAS ou REVERSÍVEIS

Desaparecem com a remoção da tensão causadora.



b) PLÁSTICAS ou IRREVERSÍVEIS

São permanentes, **não** desaparecem com a remoção da tensão causadora.



Massa de vidraceiro

REOLOGIA:

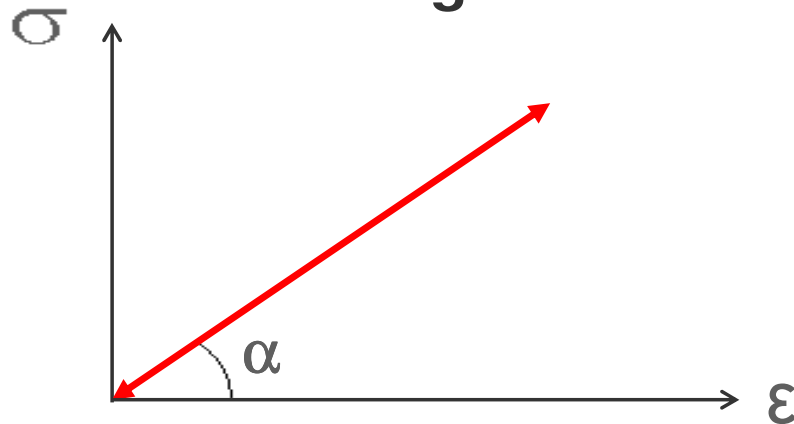
a.1) Deformações **ELÁSTICAS** ou **REVERSÍVEIS** Comportamento Linear

A deformação desaparece com a remoção da tensão.

Lei de Hooke

$$E = \operatorname{tg} \alpha = \sigma / \varepsilon$$

E = Módulo de deformação linear
ou módulo de elasticidade.



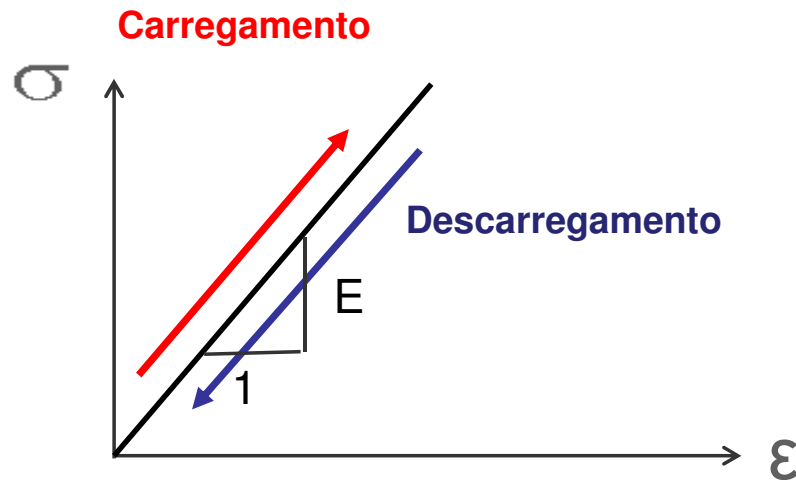
Exemplos:
Aço (trecho), concreto, ...

Diagrama tensão x deformação representando uma **deformação elástica linear**.

REOLOGIA:

a.1) Deformações **ELÁSTICAS** ou **REVERSÍVEIS**
Comportamento Linear

Lei de Hooke



Para os materiais com comportamento linear o E é constante.

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

REOLOGIA:

a.1) Deformações **ELÁSTICAS** ou **REVERSÍVEIS** Comportamento não Linear

A deformação elásticas também podem ter comportamento não linear. Não há proporcionalidade entre as tensões e deformações

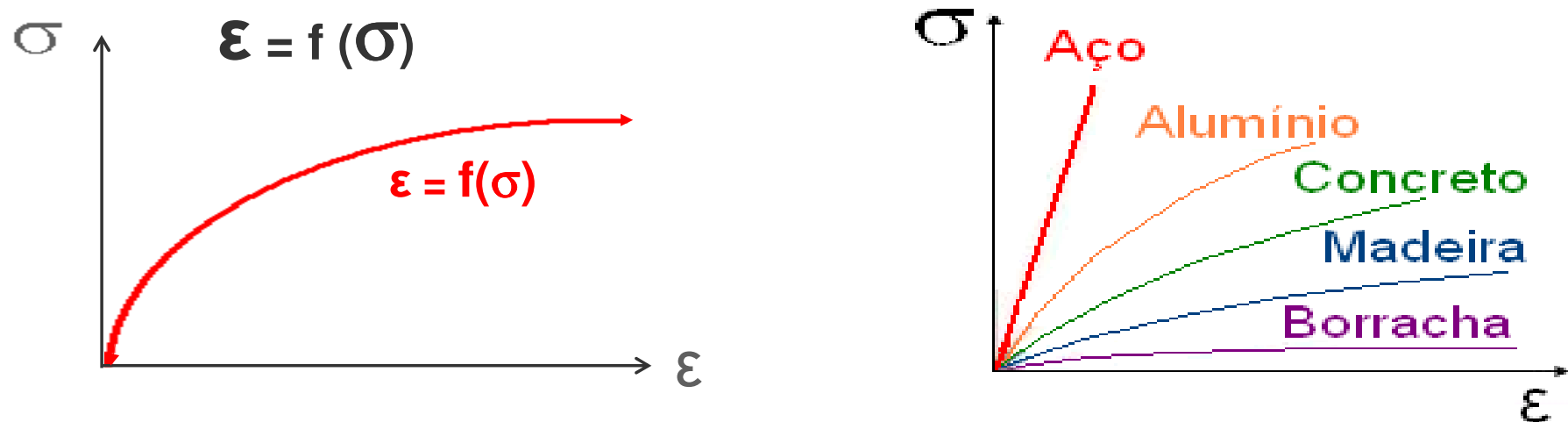


Diagrama tensão x deformação representando uma deformação elástica **não linear**.

REOLOGIA:

b) Deformações **PLÁSTICAS** ou **IRREVERSÍVEIS**

São deformações permanentes, **não** desaparecem com a remoção da tensão causadora.

A deformação só ocorre se a tensão aplicada for superior a um determinado valor (R).

Se a tensão for inferior a R não há deformação.

Quando a tensão alcança o valor de R as deformações são ilimitadas.



Diagrama tensão x
deformação.

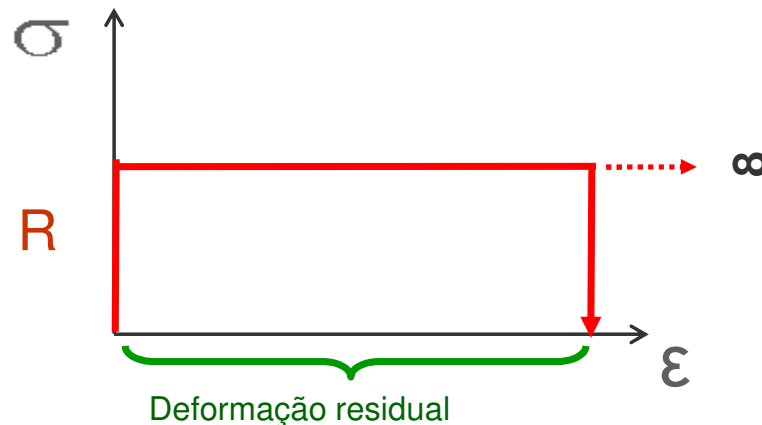
Exemplo:
Massa de vidraceiro.

REOLOGIA:

b) Deformações **PLÁSTICAS** ou **IRREVERSÍVEIS**

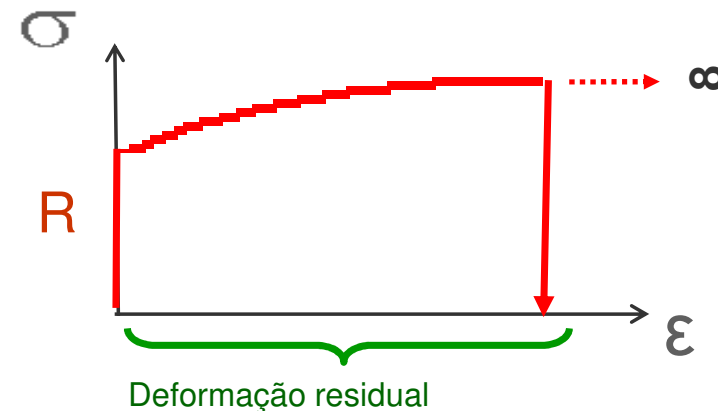
Plasticidade perfeita:

A tensão σ permanece constante enquanto a deformação plástica cresce.



Plasticidade com encruamento:

A tensão não permanece constante, crescendo com a deformação.

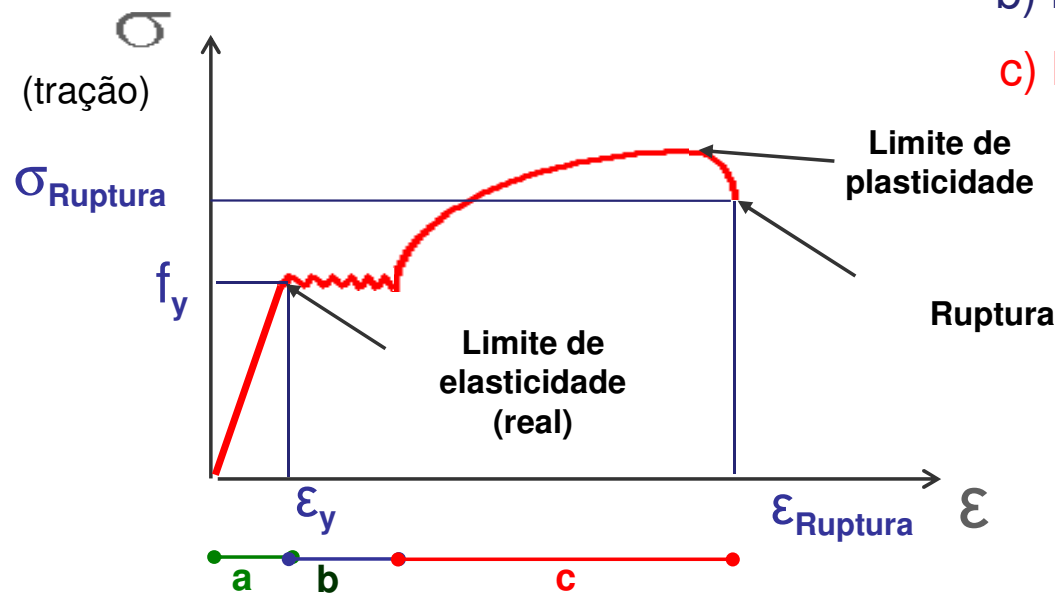


A descarga se faz sem reversibilidade das deformações.

REOLOGIA:

Os materiais reais apresentam em geral deformações elásticas e plásticas.

Diagrama tensão x deformação do aço CA 50



Deformações:

a) Elástica linear

b) Plástica

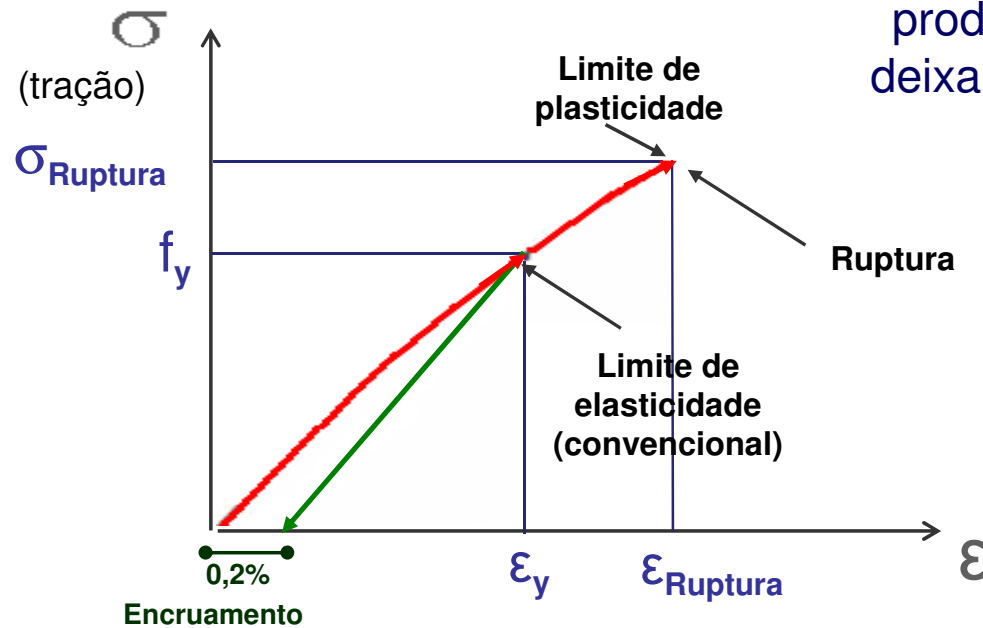
c) Elastoplástica não linear



REOLOGIA:

Os materiais reais apresentam em geral deformações elásticas e plásticas.

Diagrama tensão x deformação do aço CA 60



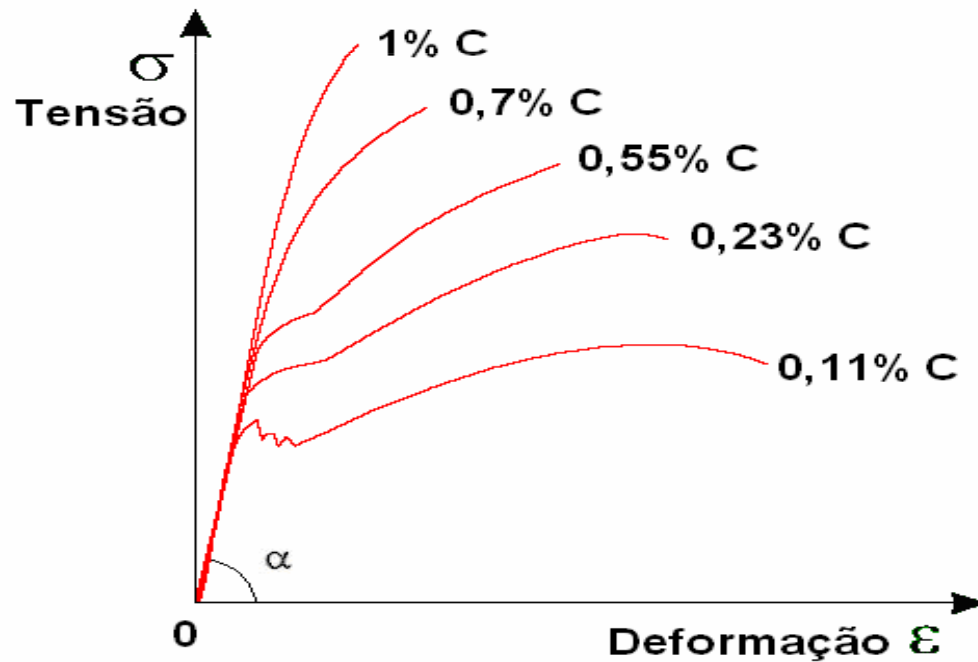
O aço CA 60 para concreto armado é produzido por trefilação, processo que o deixa com um certo grau de encruamento.



REOLOGIA:

Os materiais reais apresentam em geral deformações elásticas e plásticas.

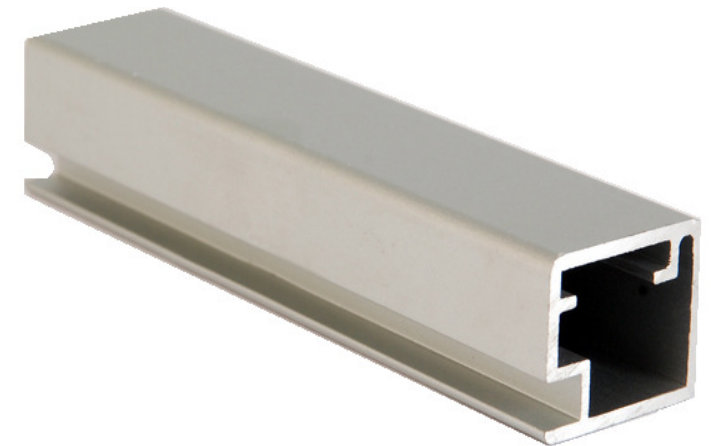
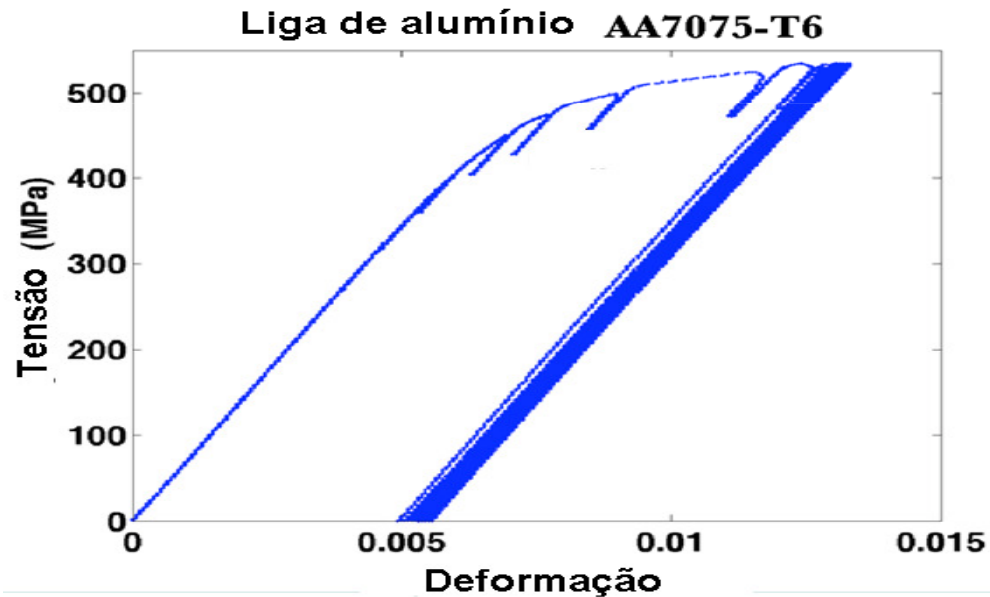
Aço: Efeitos da variação do % de carbono no diagrama tensão x deformação



REOLOGIA:

Os materiais reais apresentam em geral deformações elásticas e plásticas.

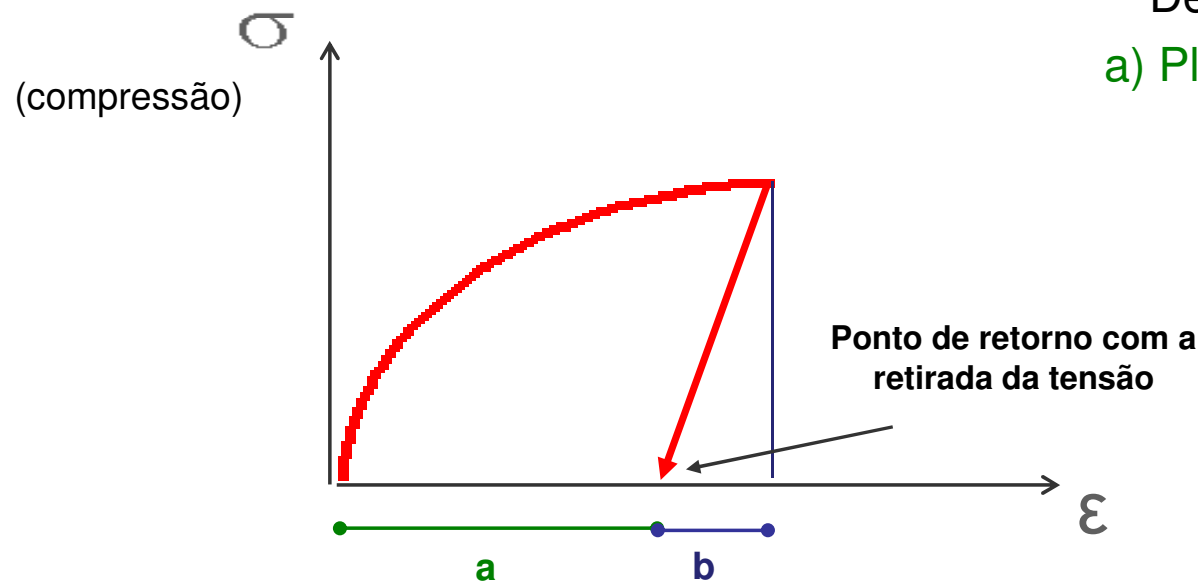
Ex.: Alumínio



REOLOGIA:

Os materiais reais apresentam em geral deformações elásticas e plásticas.

Diagrama tensão x deformação de concreto



Deformações:

a) Plástica

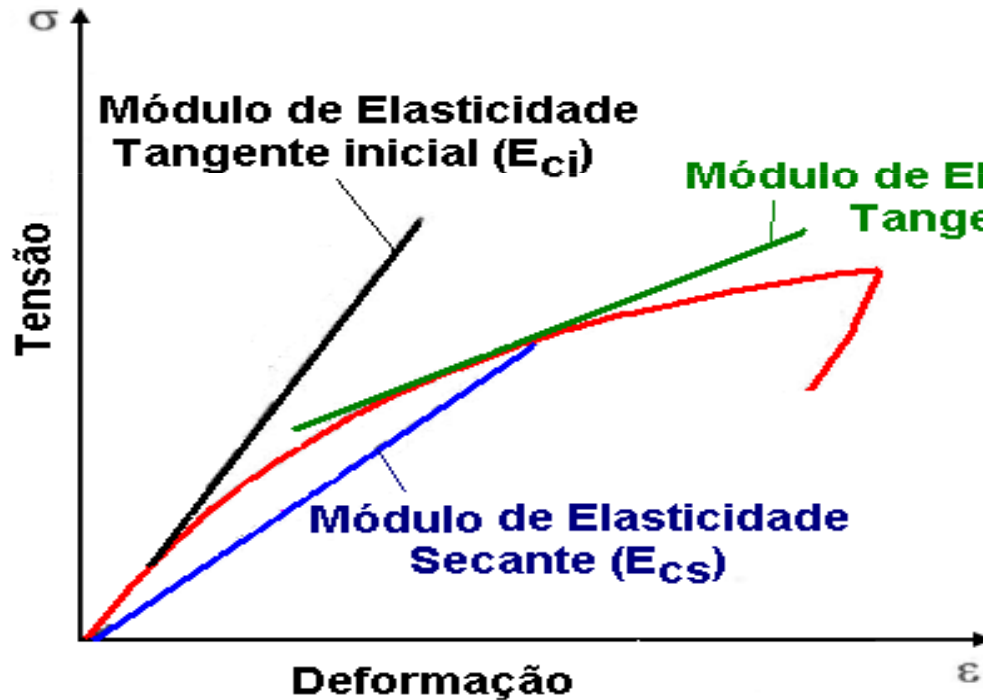
b) Elástica



REOLOGIA:

Diagrama tensão x deformação de concreto

Como o comportamento do concreto não é linear, para simplificar usa-se normalmente o E_c tangente.



$$E_c = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

REOLOGIA:

c) Deformações **LENTAS** ou **VISCOSAS**

Iniciam de imediato mas desenvolvem-se lentamente, continuando muito depois da aplicação da tensão.

Qualquer tensão que mantenha-se permanente causa deformação ilimitada ao longo do tempo (meses... anos).

A velocidade da deformação depende da viscosidade e da tensão.

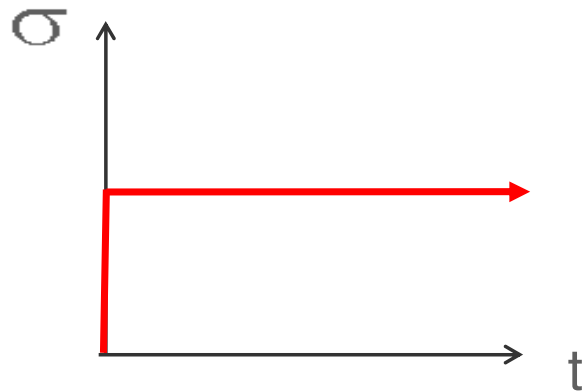


Diagrama tensão x tempo.

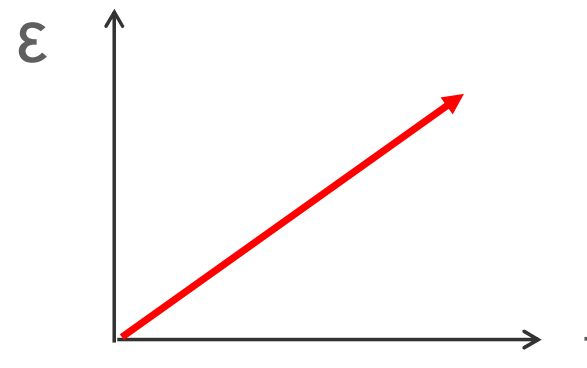
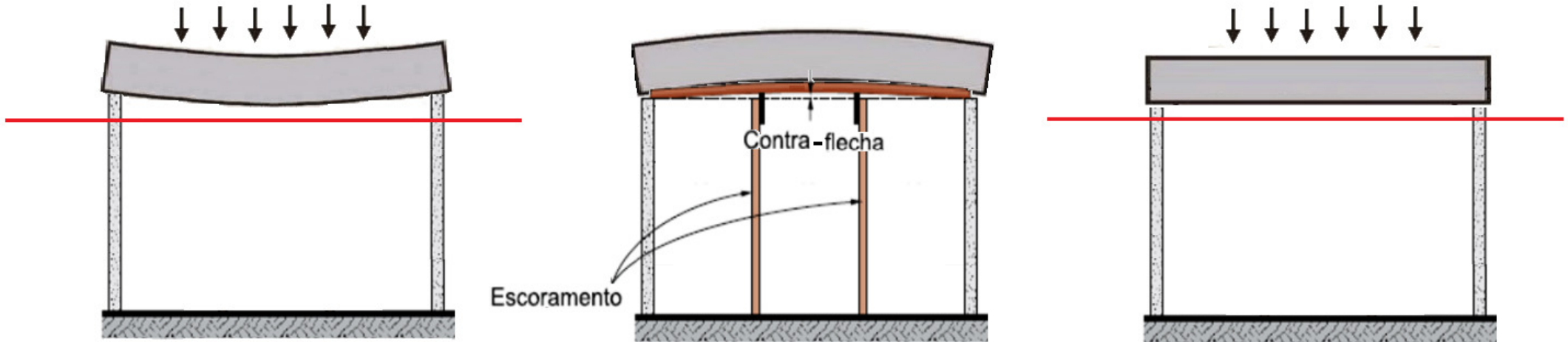


Diagrama deformação x tempo.

A importância de se estimar as deformações



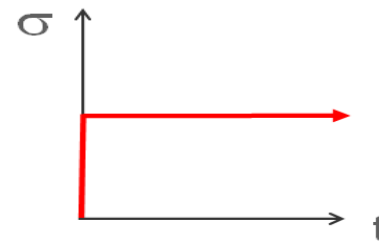
DEFORMAÇÕES
IMEDIATAS + LENTAS

Vigas moldadas com contra-flecha
Quanto?

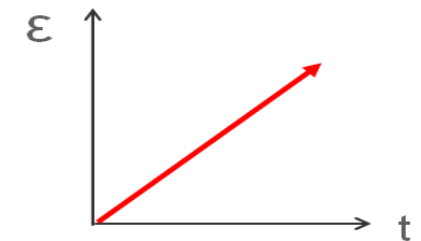
REOLOGIA:

Deformações LENTAS ou VISCOSAS

Para o estudo das deformações lentas são necessários diagramas que correlacionam as tensões e deformações em com o tempo.



tensão x tempo



deformação x tempo

Deformações IMEDIATAS



tensão x deformação

Para deformações imediatas utilizamos somente diagramas que correlacionam as tensões com as deformações.

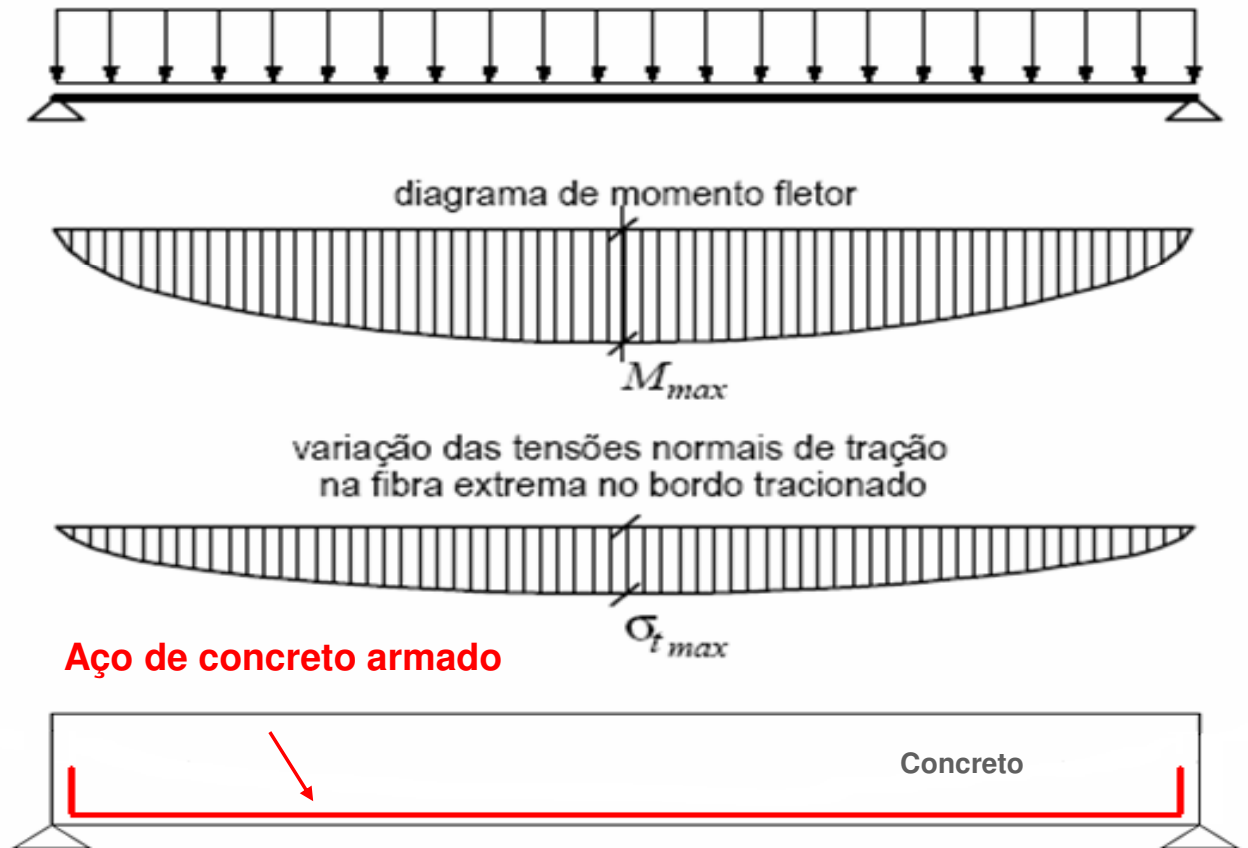
REOLOGIA:

Ex. CONCRETO PROTENDIDO:

O concreto não suporta bem tração, o aço tem grande resistência à tração.

No concreto armado usa-se o aço para absorver diretamente os esforços de tração.

As tensões que o aço de concreto armado suporta são relativamente baixas e o material pouco sofre deformações lentas.



REOLOGIA:

Ex. CONCRETO PROTENDIDO:

No concreto protendido utiliza-se o aço para comprimir o concreto e eliminar as tensões de tração.

O aço para concreto protendido, devido às altas tensões que suportam, sofrem com o fenômeno da relaxação, que é a **perda de carga devido a fluência ou deformação lenta.**

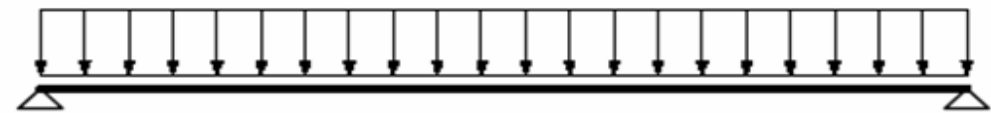
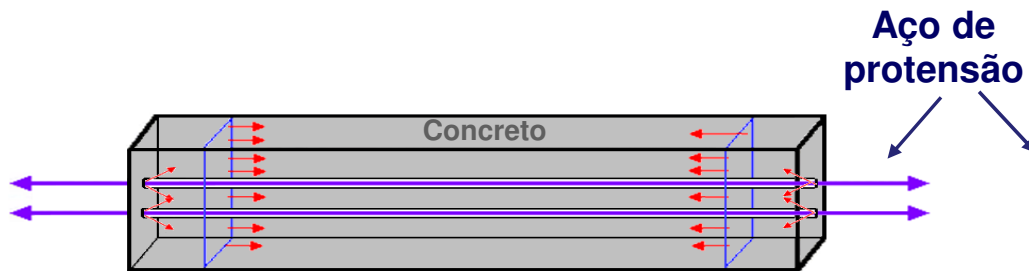
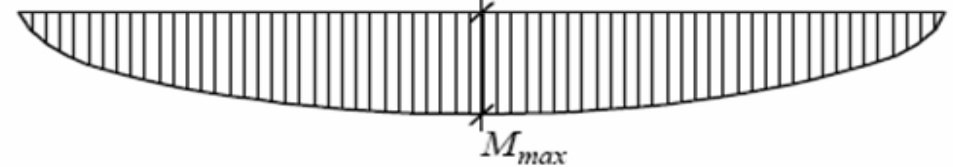
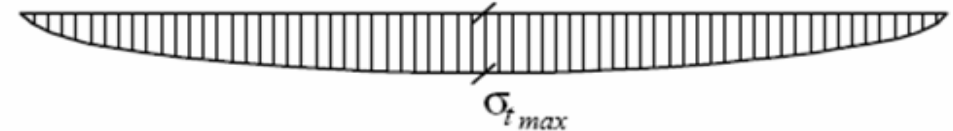


diagrama de momento fletor



variação das tensões normais de tração na fibra extrema no bordo tracionado



REOLOGIA:**Ex. CONCRETO PROTENDIDO:****Efeitos das deformações lentas:**

Em peças estruturais de concreto protendido as deformações lentas dos materiais tem dois efeitos que obrigatoriamente devem ser considerados, por causar perda de tensão no aço:

- a. A relaxação do **aço** (causa perda de tensão)
- b. A fluência do **concreto** comprimido que causa redução de dimensões na peça estrutural (também causa perda de tensão no aço)

Para contrapor estes fenômenos, calcula-se estas perdas de tensões e se aplica uma tensão extra para compensar.

REOLOGIA:

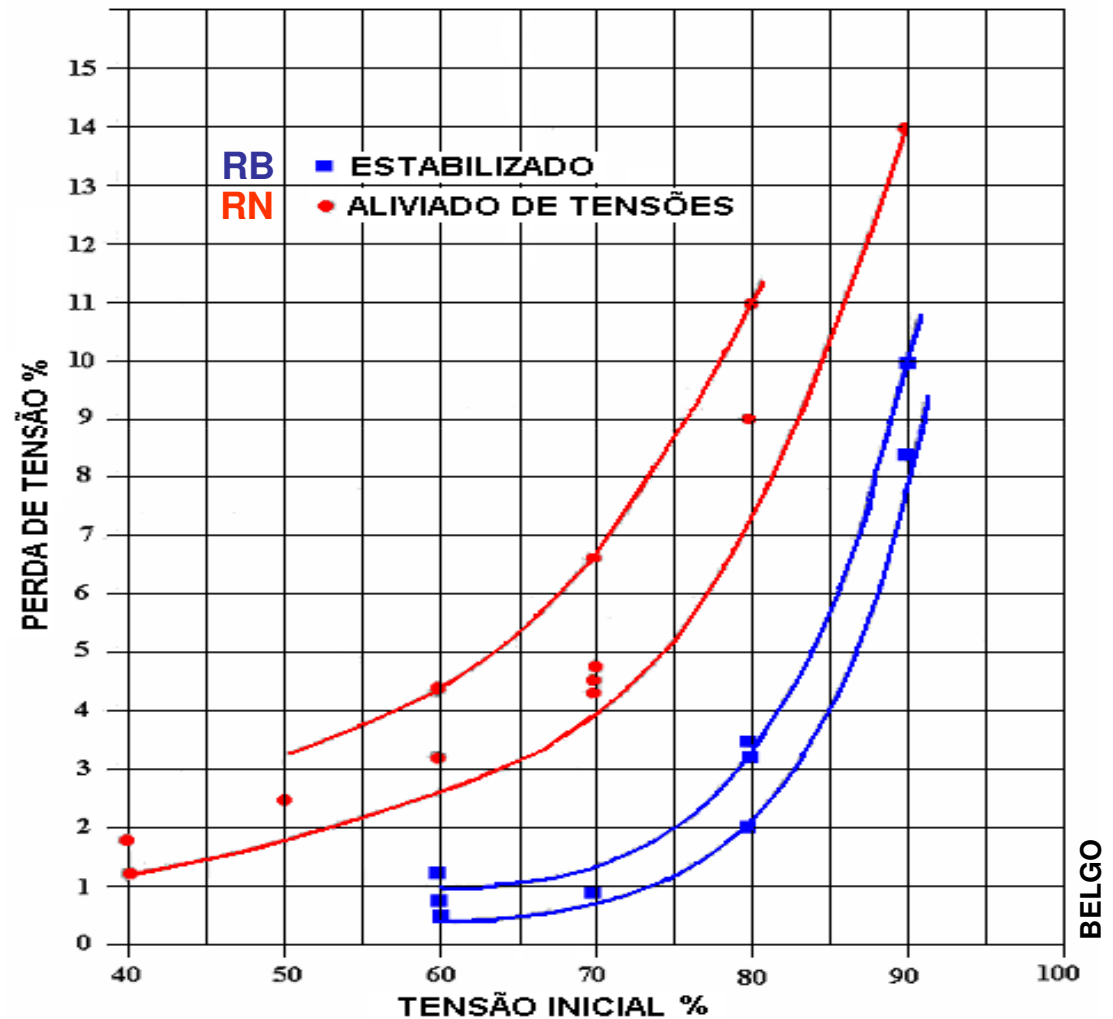
Ex. CONCRETO PROTENDIDO:

Relaxação isotérmica:

A fluência do aço tem como efeito a perda de tensão de protensão em função da carga inicial (% do que o aço suporta).



Ensaio de relaxação 1.000 h



BELGO

REOLOGIA:

Ex. CONCRETO PROTENDIDO:

Relaxação isotérmica:

Fluência é o alongamento no tempo sob tensão constante e a relaxação a perda de tensão sob comprimento constante.

Tratamentos térmicos amenizam estas perdas (aços de relaxação baixa RB).

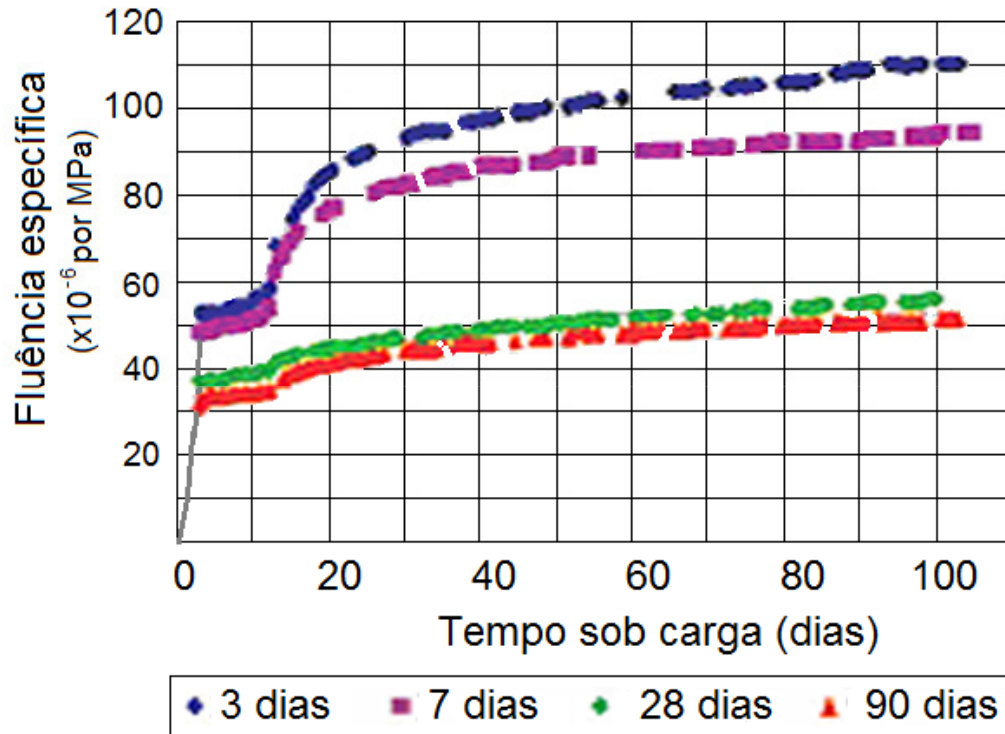
A perda de tensão $\Delta\sigma$ nas armaduras protendidas, devida à relaxação do aço desde o instante “ t_0 ” do estiramento de armadura até o instante “ t ”, é dada pela expressão:

$$\Delta\sigma (t,t_0)=\psi(t,t_0) \sigma_{pi}$$

$\psi(t, t_0)$ = coeficiente de relaxação do aço entre t_0 e t

σ_{pi} = tensão efetiva na armadura de protensão.

REOLOGIA:



Influência da idade de carregamento na fluência, para concreto com relação $a/c=0,52$.

Ex. CONCRETO PROTENDIDO:

Fluência do concreto:

A fluência do concreto tem como resultado o “encolhimento” do concreto exposto a tensões de compressão por longos períodos. A perda de dimensões também “afrouxa” o aço de protensão.

Quanto maior a tensão, e quanto mais cedo esta for aplicada, maior a fluência.

REOLOGIA:

MODELOS REOLÓGICOS

Para criar equações que representem o comportamento dos materiais quanto as tensões e deformações, utiliza-se modelos reológicos.

Existem modelos para cada forma de deformação, imediatas e lentas assim como plásticas e elásticas.

Utilizando os modelos simples, ou em composições, podemos montar conjuntos de equações que representam de forma simplificada o comportamento real dos materiais.

Temos que imaginar cada modelo (simples ou composto) como uma partícula individual do material.

REOLOGIA: MODELOS REOLÓGICOS SIMPLES

Modelos reológicos simples para representar deformações imediatas:

a) ELÁSTICO

Representado por uma mola.



Equação de comportamento:

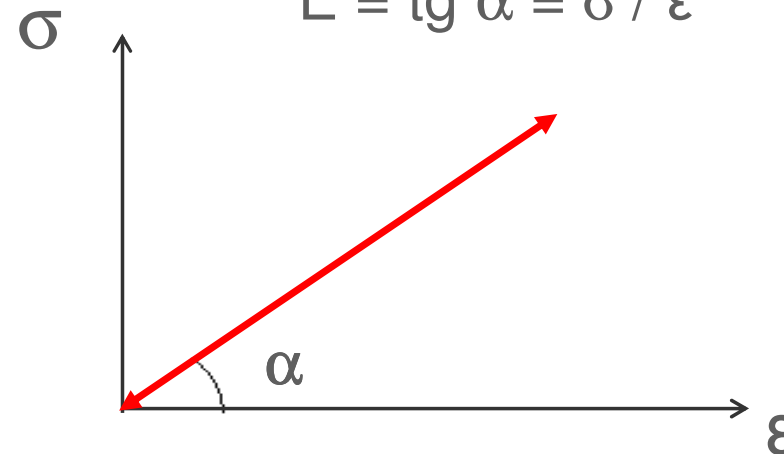
$$E = \text{tg } \alpha = \sigma / \varepsilon$$

Modelo elástico de Robert Hooke:

Equação de comportamento:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

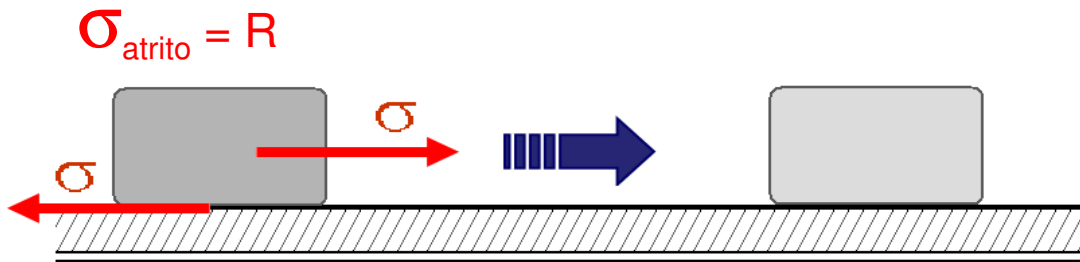
Modelo:



REOLOGIA: MODELOS REOLÓGICOS SIMPLES

b) PLÁSTICO

Representado por um corpo que escorrega sobre uma superfície horizontal plana, mas que possui um coeficiente de atrito R .



Modelo plástico de Saint-Venant:



Equações de comportamento:

$$\sigma < R \rightarrow \epsilon = 0$$

$$\sigma = R \rightarrow \epsilon = \text{Livre}$$

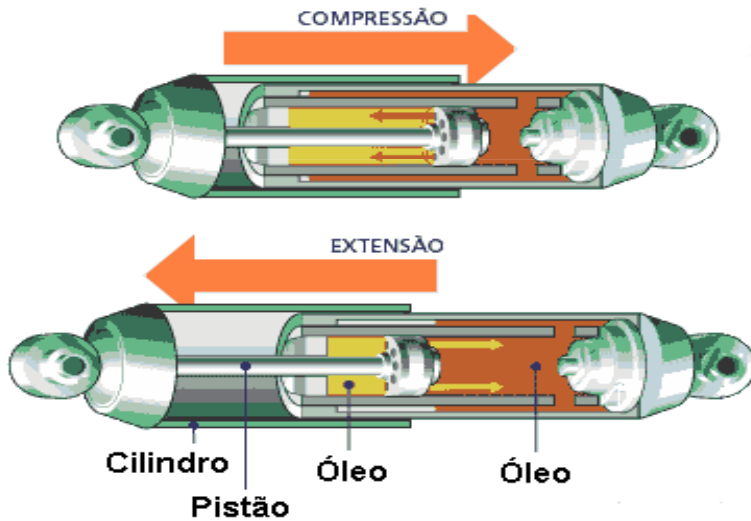
Impossível $\sigma > R$



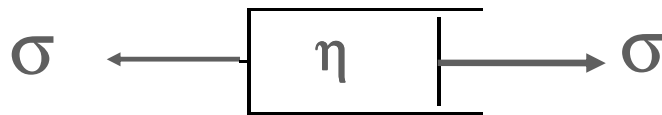
REOLOGIA: MODELOS REOLÓGICOS SIMPLES

c) VISCOSO

Representado por um pistão que corre dentro de um cilindro preenchido por um líquido viscoso.



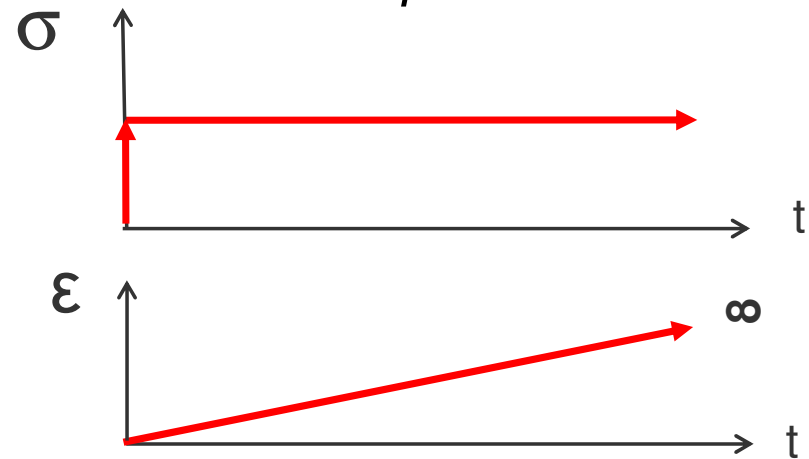
Modelo viscoso de Newton:



Equações de comportamento:

$$\sigma > 0 \rightarrow \epsilon \text{ Livres lentas}$$

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma}{\eta} t$$



MODELOS REOLÓGICOS SIMPLES: **Resumo**

DEFORMAÇÕES IMEDIATAS

ELÁSTICAS



$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

PLÁSTICAS



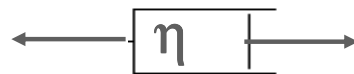
$$\sigma < R \rightarrow \epsilon = 0$$

$$\sigma = R \rightarrow \epsilon = \text{Livre}$$

$$\text{Impossível } \sigma > R$$

DEFORMAÇÕES LENTAS

VISCOSO



η (viscosidade)

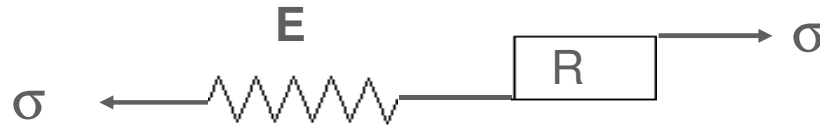
$$\epsilon = (\sigma / \eta) \cdot t$$

O valor da viscosidade η determina a velocidade da deformação

MODELOS REOLÓGICOS CONJUGADOS:

EM SÉRIE:

Ex: Elastoplástico



Deformação imediata

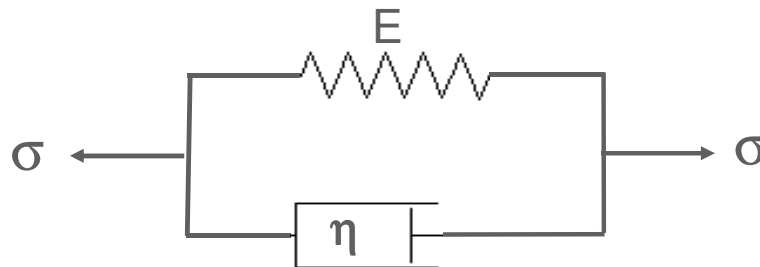
$$p/ \sigma < R \rightarrow \epsilon = \sigma / E$$

$$p/ \sigma = R \rightarrow \epsilon = \text{Livre}$$

Impossível $\sigma > R$

EM PARALELO:

Ex: Elasto-viscoso



Deformação lenta

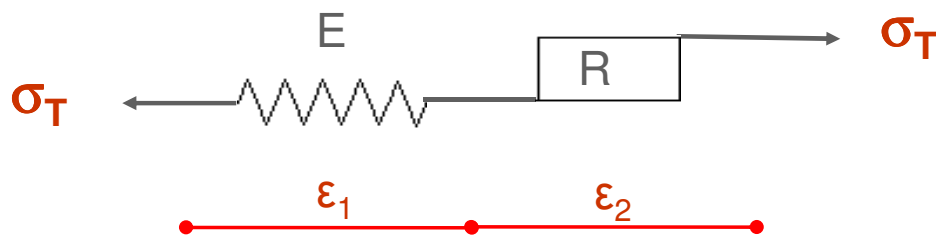
$$\sigma < R \rightarrow \epsilon_{\text{total}} = \sigma / E$$

MODELOS REOLÓGICOS CONJUGADOS:

MODELOS em SÉRIE:

Regras de funcionamento:

- Deformações são diferentes para cada elemento;
- A deformação total é a soma das deformações individuais dos elementos.
- Sempre toda a tensão é suportada integralmente por todos os elementos.



$$a) \epsilon_{\text{total}} = \epsilon_1 + \epsilon_2$$

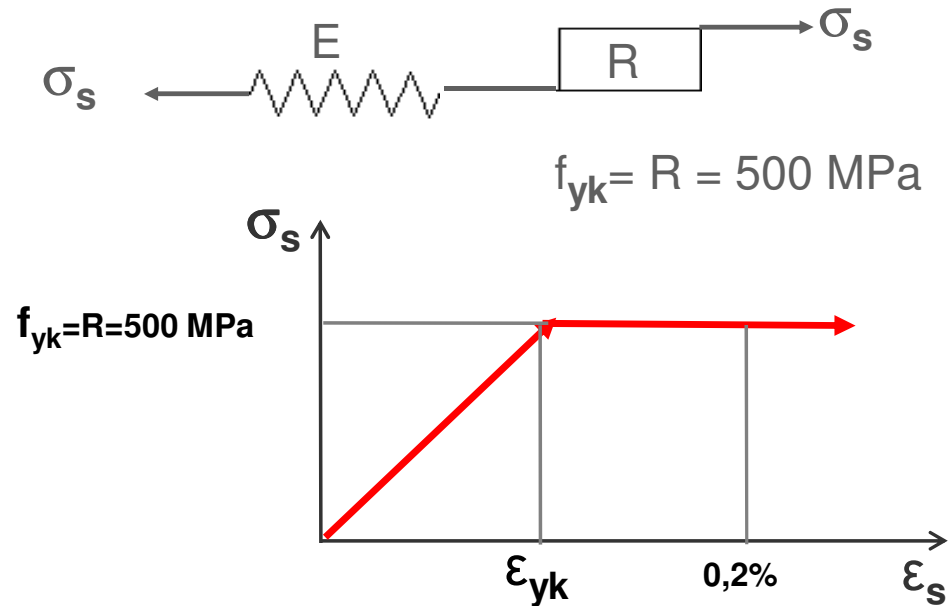
$$\epsilon_1 = \sigma / E$$

$$\epsilon_2 = 0 \quad \text{para } \sigma < R$$

$$\epsilon_2 = \text{LIVRE} \quad \text{para } \sigma = R$$

MODELOS REOLÓGICOS :

Modelo elastoplástico de Prandtl-Reuss:



1) Exemplo que representa o comportamento simplificado para o aço CA-50:

$$R = 500 \text{ MPa}$$

$$E = 210.000 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{yk} = \sigma / E$$

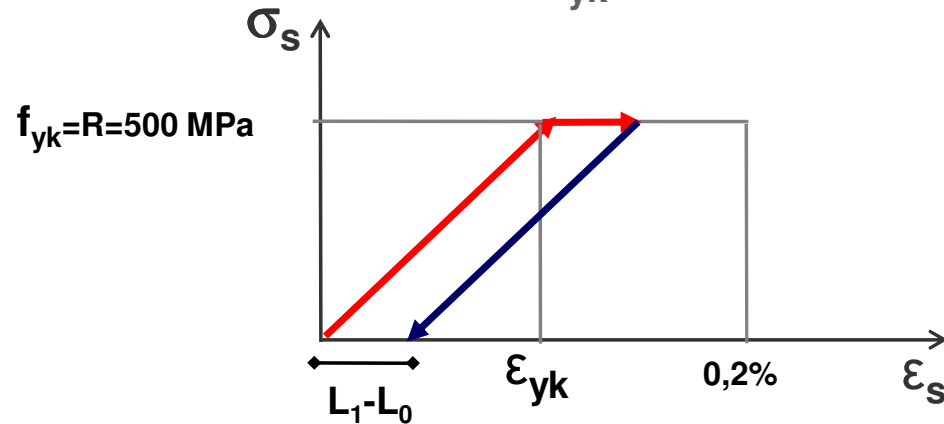
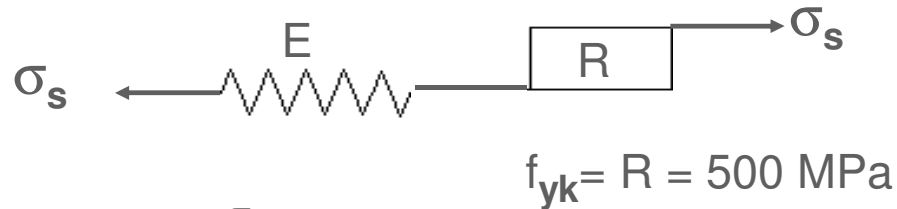
$$\epsilon_{yk} = 500 / 210.000$$

$$\epsilon_{yk} = 0,00238 \text{ m/m}$$

Não interessa, para o concreto armado, considerar as deformações do aço acima do $0,2\%$, pois neste ponto o concreto já estará completamente fraturado.

MODELOS REOLÓGICOS :

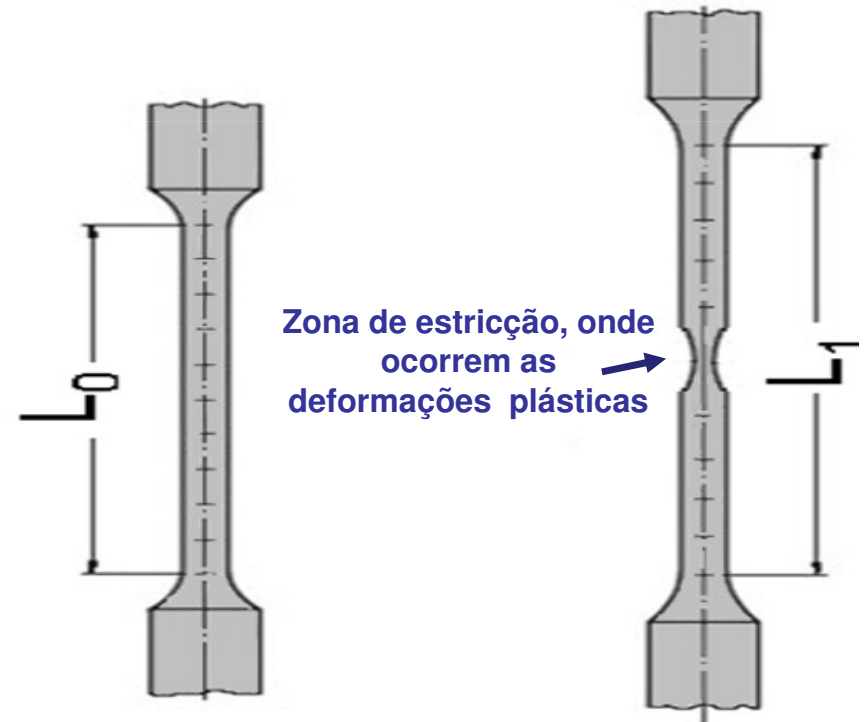
Modelo elastoplástico de Prandtl-Reuss:



1.b) Exemplo que representa o comportamento simplificado para o aço CA-50:

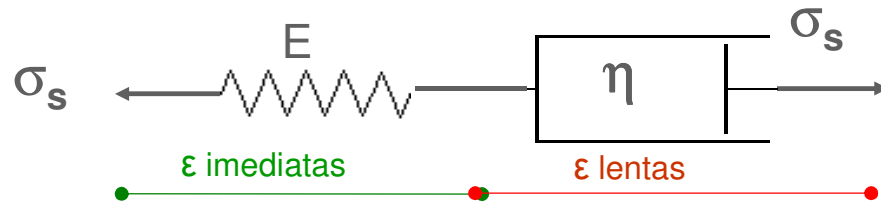
$$R = 500 \text{ MPa}$$

$$E = 210.000 \text{ MPa}$$



MODELOS REOLÓGICOS :

Modelo viscoelástico de Maxwell:



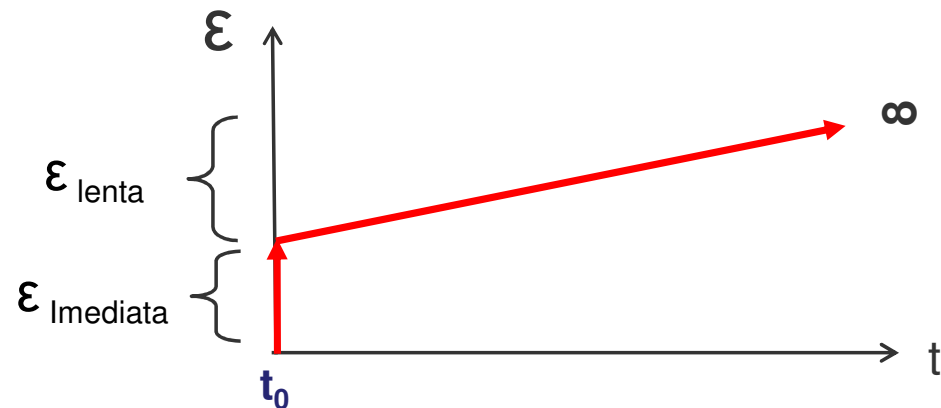
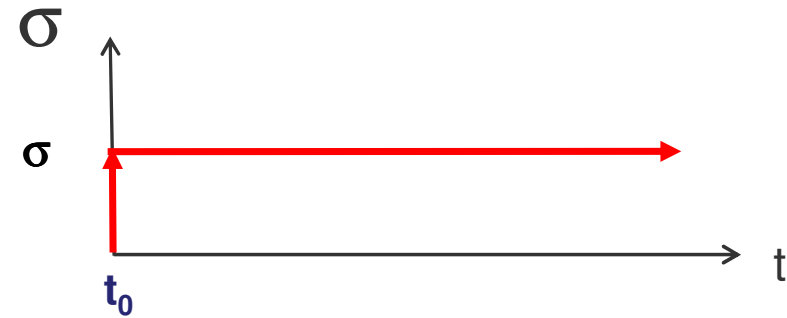
Em t_0 : $\epsilon_{\text{Imediata}} = \sigma / E$

Após t_0 : $\epsilon_{\text{Lenta}} \rightarrow \infty$

$$\epsilon(t) = (\sigma / \eta) \cdot t$$

$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_{\text{imediata elástica}} + \epsilon_{\text{lenta ou viscosa}}$$

1.c) Exemplo que associa em série um modelo elástico e um viscoso:

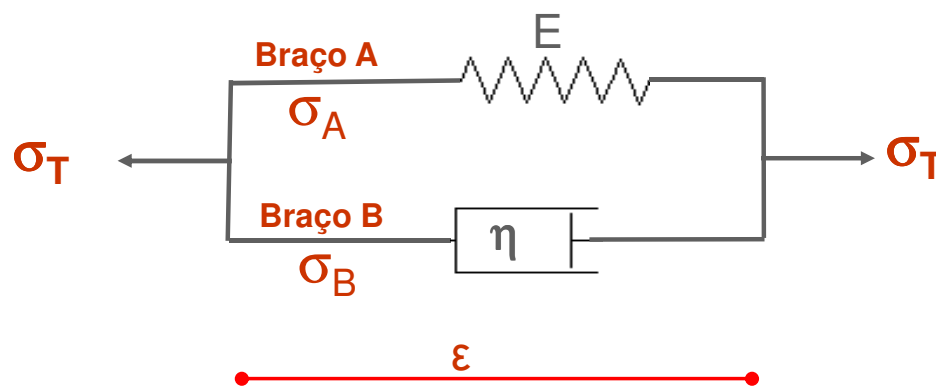


MODELOS REOLÓGICOS CONJUGADOS:

MODELOS em PARALELO:

Regras de funcionamento:

- a) Deformações nos braços são sempre simultâneas e idênticas;
- b) A soma das tensões que passa pelos braços é sempre igual a tensão total.

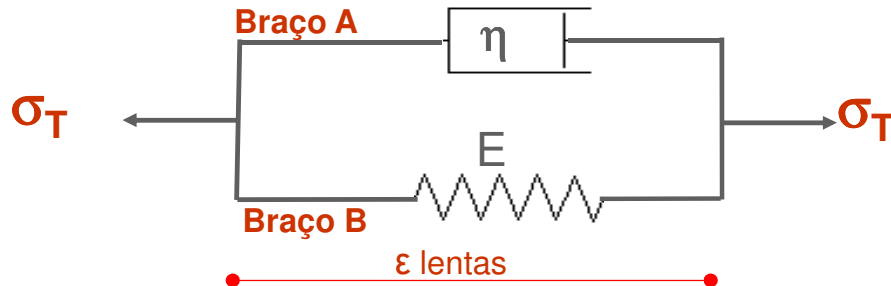


$$a) \epsilon_{\text{braço A}} = \epsilon_{\text{braço B}}$$

$$b) \sigma_T = \sigma_A + \sigma_B$$

MODELOS REOLÓGICOS :

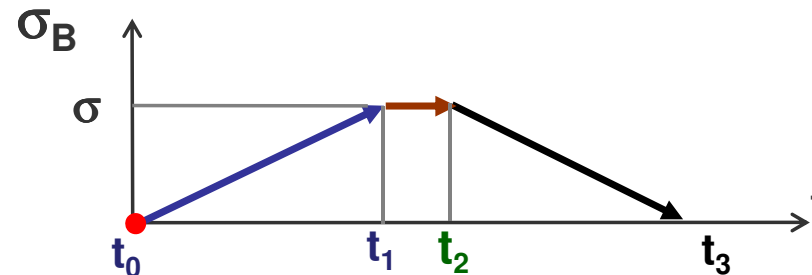
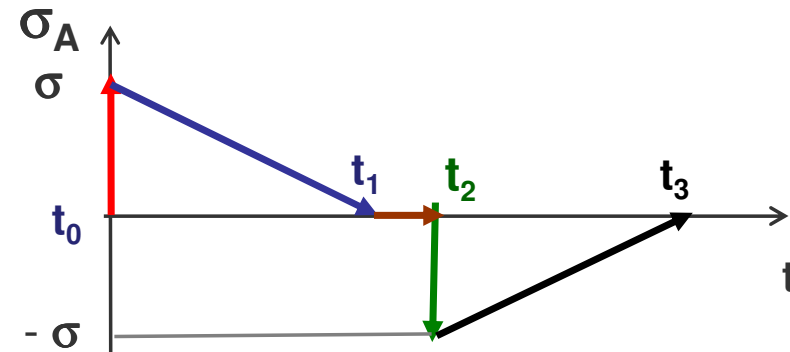
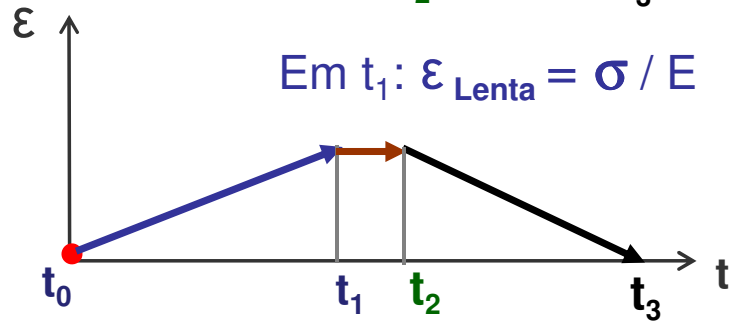
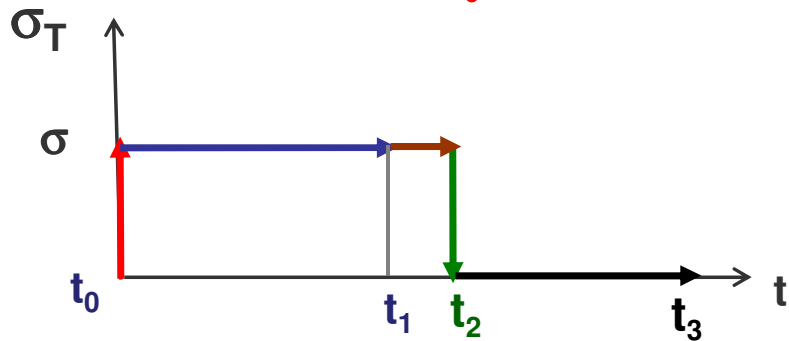
Modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt:



2) Exemplo somente com deformações lentas:

a) $\epsilon_{\text{braço A}} = \epsilon_{\text{braço B}}$

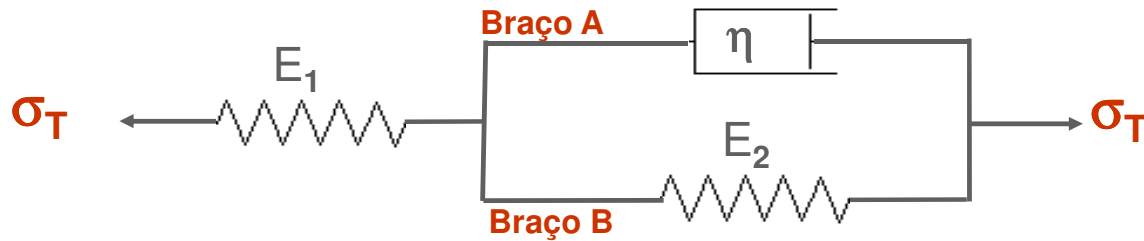
b) $\sigma_T = \sigma_A + \sigma_B$



MODELOS REOLÓGICOS :

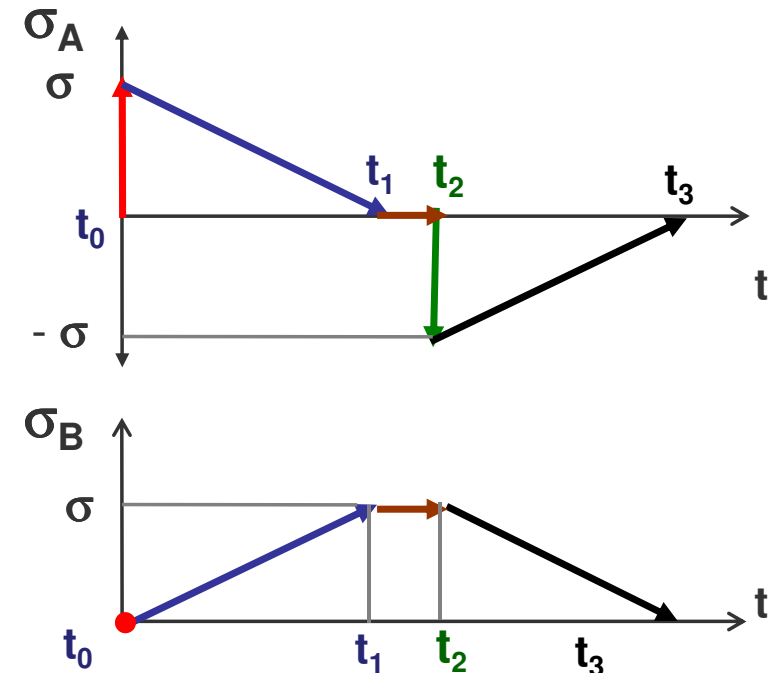
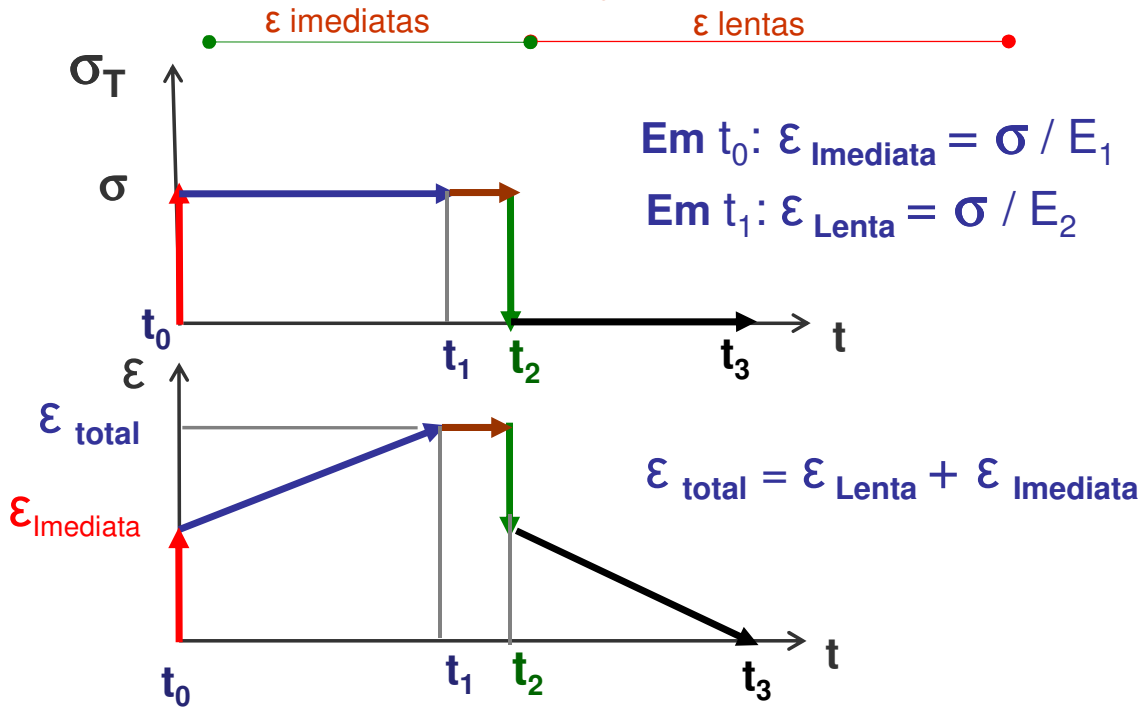
3) Exemplo com deformações imediatas e lentas:

Modelo viscoelástico de Terzaghi p/ solos saturados:



a) $\epsilon_{\text{braço A}} = \epsilon_{\text{braço B}}$

b) $\sigma_T = \sigma_A + \sigma_B$



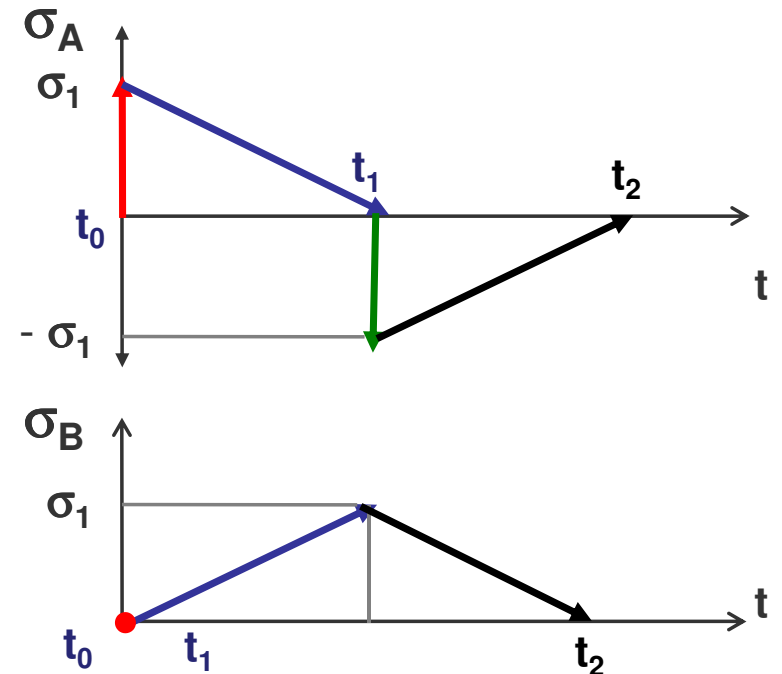
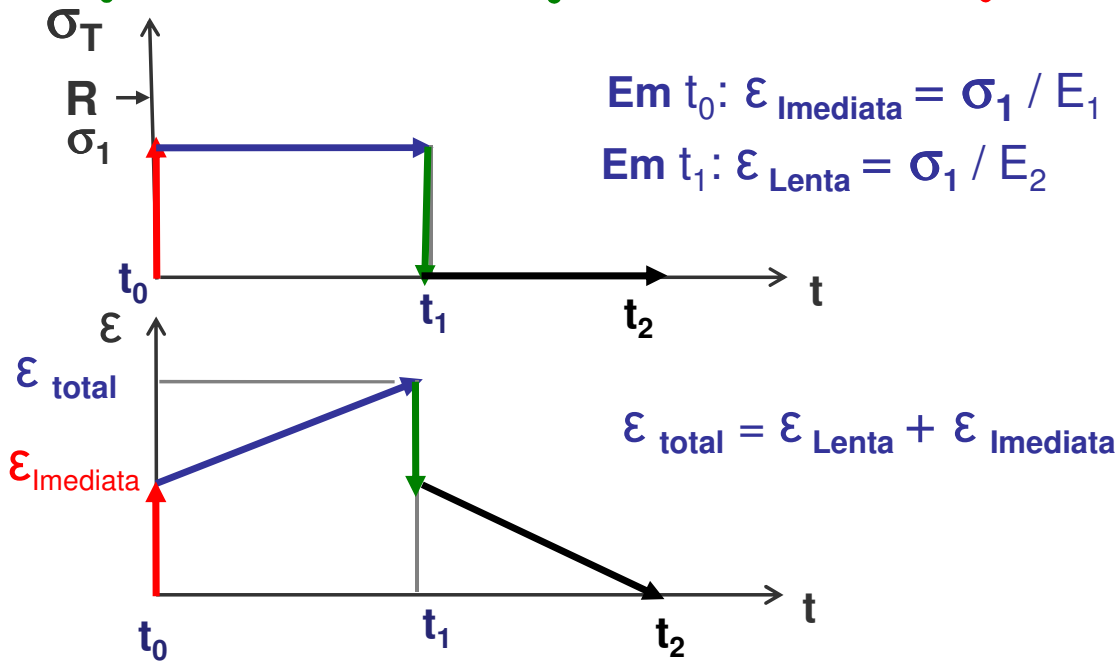
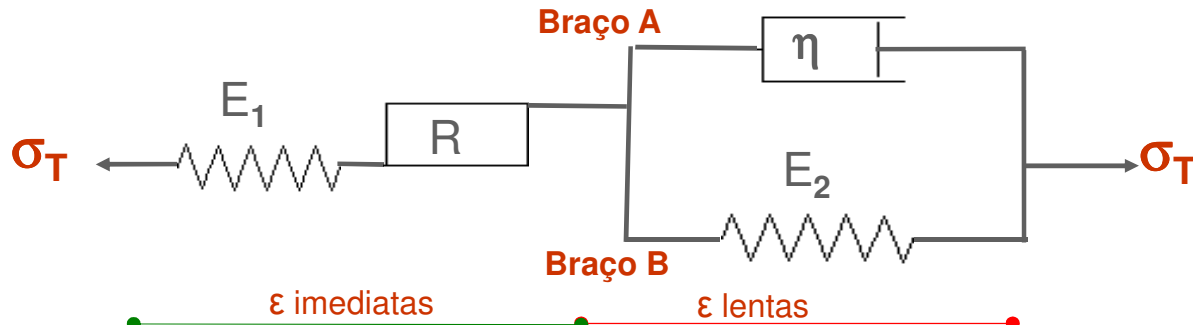
MODELOS REOLÓGICOS :

4.a) Exemplo com deformações imediatas elásticas/plásticas e lentas:

Para $\sigma_1 < R$

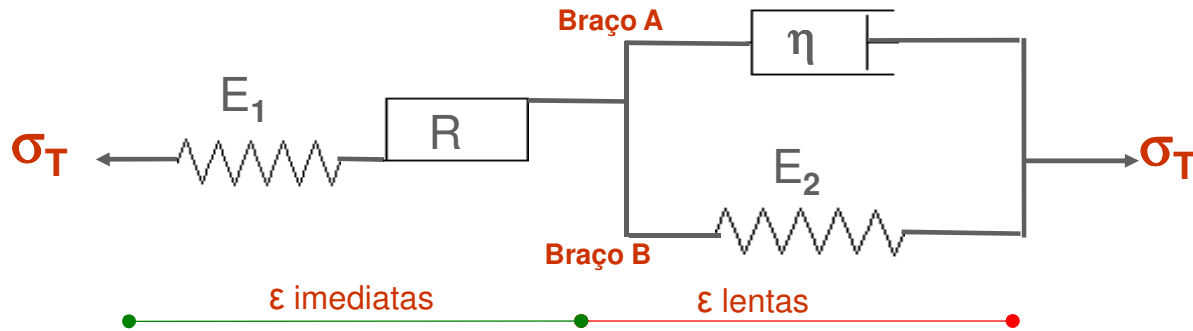
a) $\epsilon_{\text{braço A}} = \epsilon_{\text{braço B}}$

b) $\sigma_T = \sigma_A + \sigma_B$



MODELOS REOLÓGICOS :

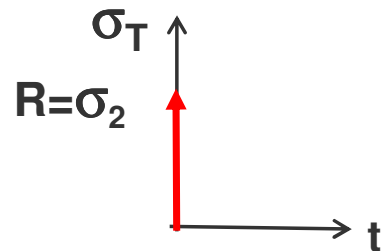
4.b) Exemplo com deformações imediatas elásticas/plásticas e lentas:



Para $\sigma_2 = R$

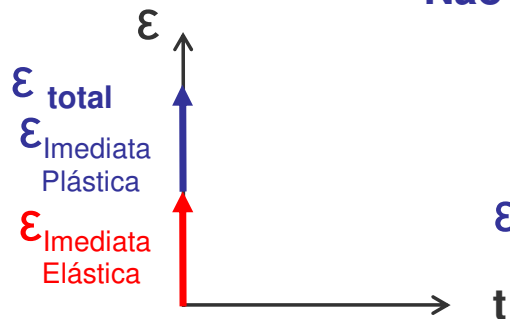
a) $\epsilon_{\text{braço A}} = \epsilon_{\text{braço B}}$

b) $\sigma_T = \sigma_A + \sigma_B$



Em t_0 : $\epsilon_{\text{Elástica}} = \sigma_2 / E_1$
 Em t_0 : $\epsilon_{\text{Plástica}} \rightarrow \text{Livre}$

Não há tempo para deformações lentas, a ruptura ocorre pelo acúmulo das deformações imediatas.

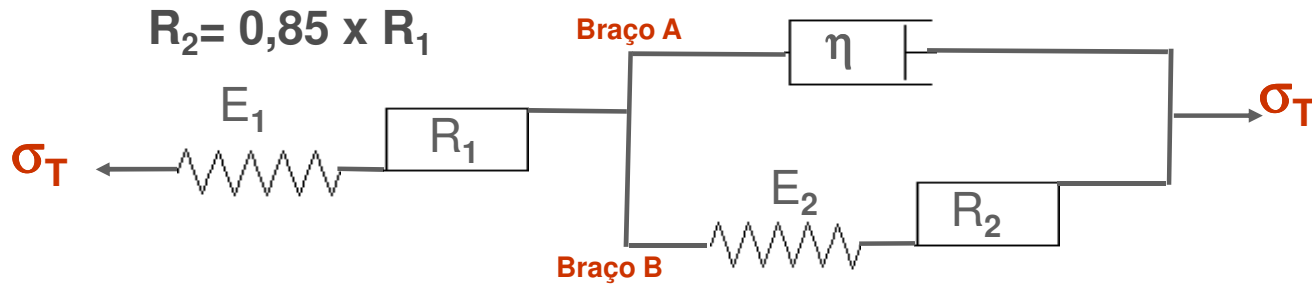


$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_{\text{Elástica}} + \epsilon_{\text{Plástica}} \rightarrow \text{livre}$



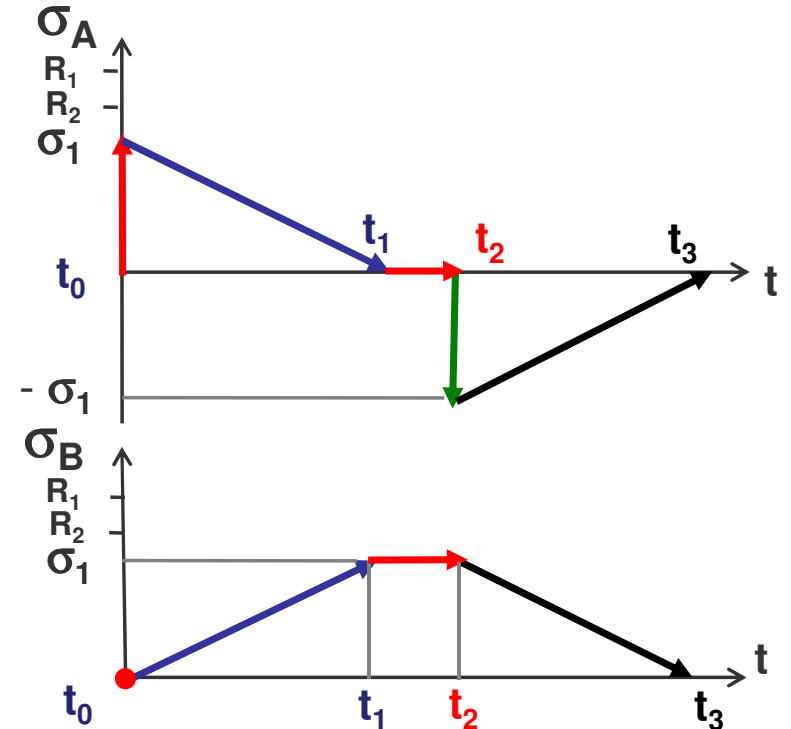
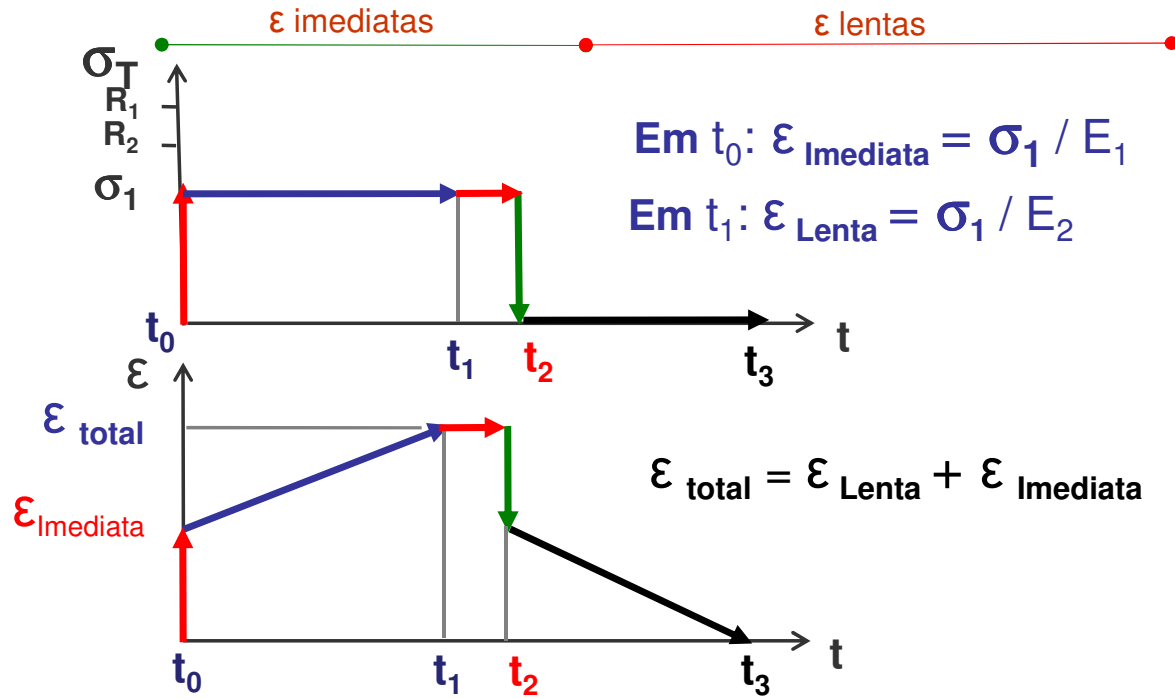
MODELOS REOLÓGICOS :

5.a) Modelo para o concreto:
de Ludwig Boltzmann (ou Kelvin-Voigt)

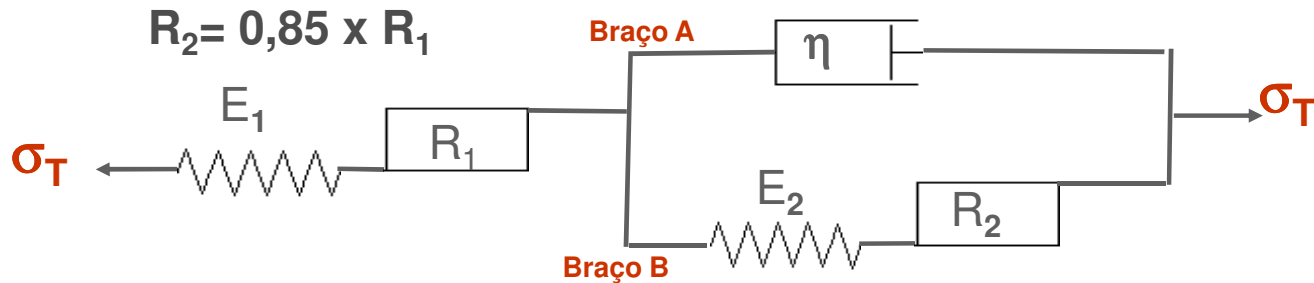


Para $\sigma_1 < R_2$

- a) $\epsilon_{\text{braço A}} = \epsilon_{\text{braço B}}$
- b) $\sigma_T = \sigma_A + \sigma_B$



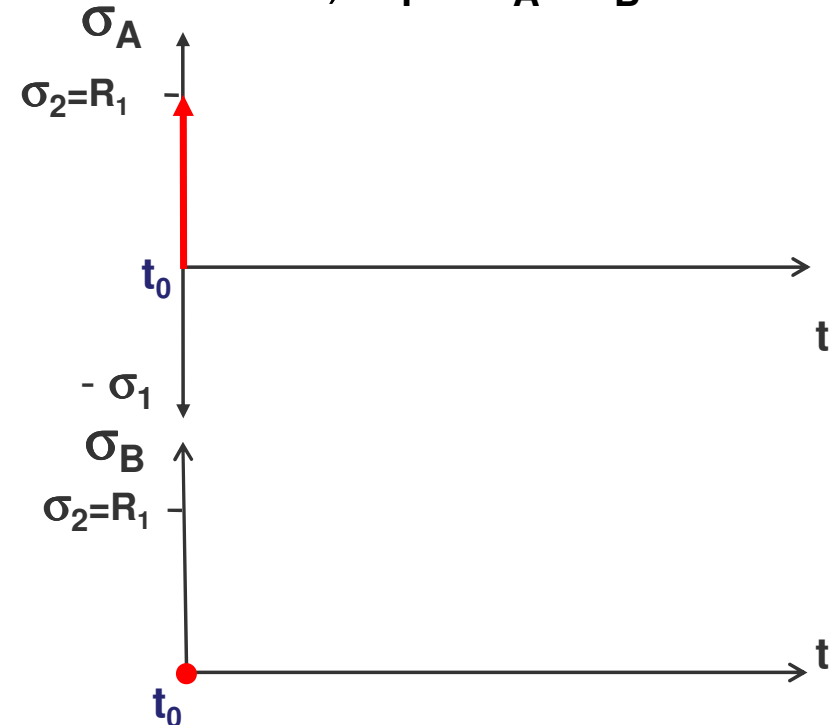
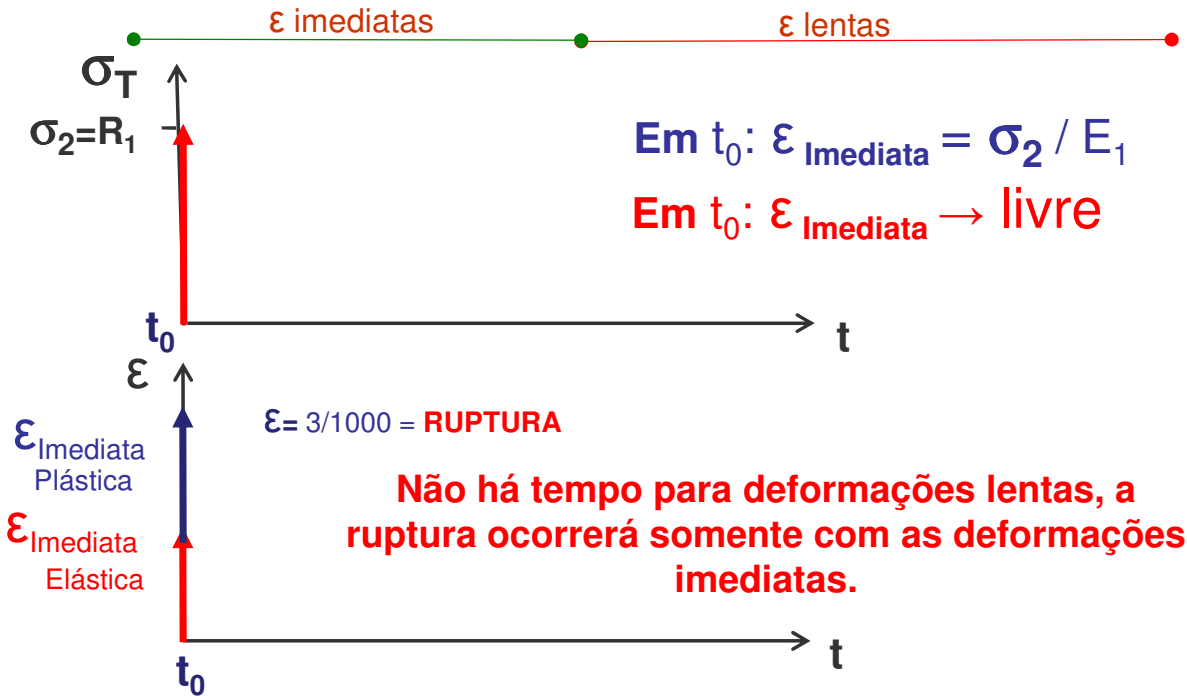
MODELOS REOLÓGICOS :



5.b) Modelo para o concreto: de Ludwig Boltzmann (ou Kelvin-Voigt)

Para $\sigma_2 = R_1$
($R_2 < R_1$)

- a) $\epsilon_{\text{braço A}} = \epsilon_{\text{braço B}}$
- b) $\sigma_T = \sigma_A + \sigma_B$

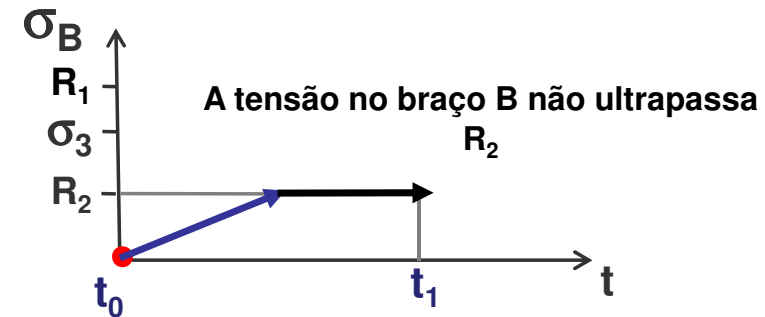
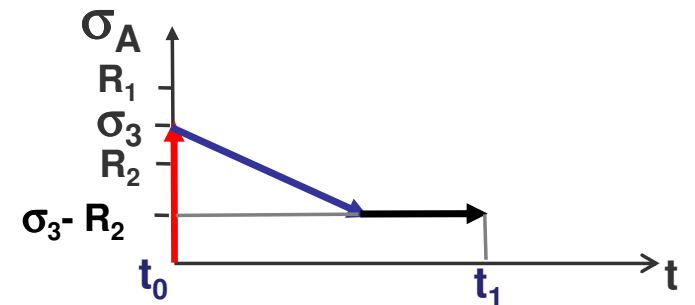
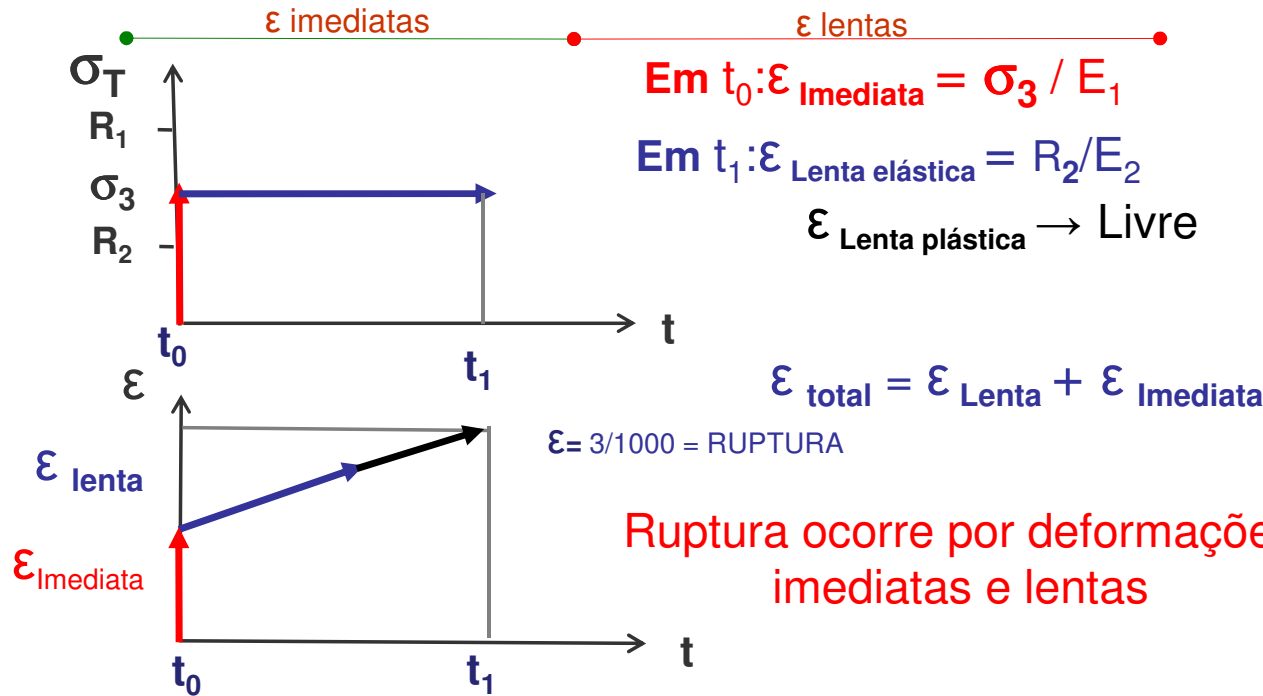
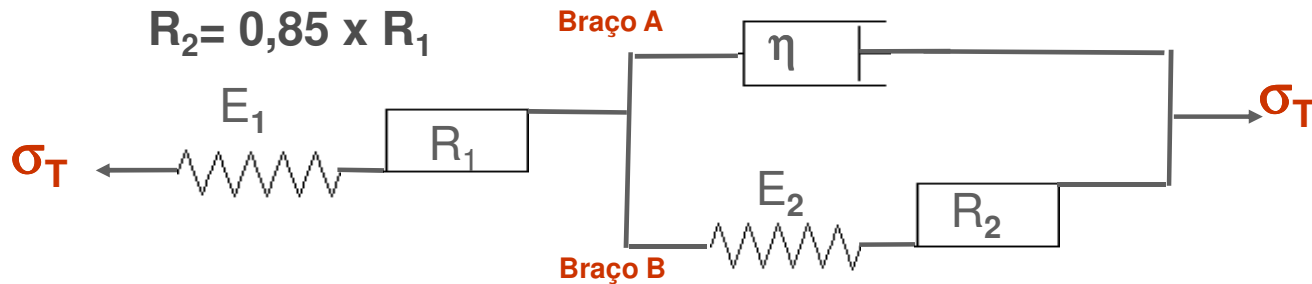


MODELOS REOLÓGICOS :

5.c) Modelo para o concreto: de Ludwig Boltzmann (ou Kelvin-Voigt)

Para $\sigma_3 > R_2$ e $\sigma_3 < R_1$

- a) $\epsilon_{\text{braço A}} = \epsilon_{\text{braço B}}$
- b) $\sigma_T = \sigma_A + \sigma_B$



Enquanto isso, na demolição



Arquivo: Filmes concreto / Implosões / risks life to demolish



Materiais de Construção

REOLOGIA

Referências bibliográficas:

Fundamentos da Mecânica dos Sólidos e das Estruturas, Paulo de Mattos Pimenta, São Paulo 2006.

Apostila da Disciplina de Materiais de Construção - REOLOGIA, José Marques Filho, José de Almendra Freitas Jr., Marianne M. M. da Costa, 2007