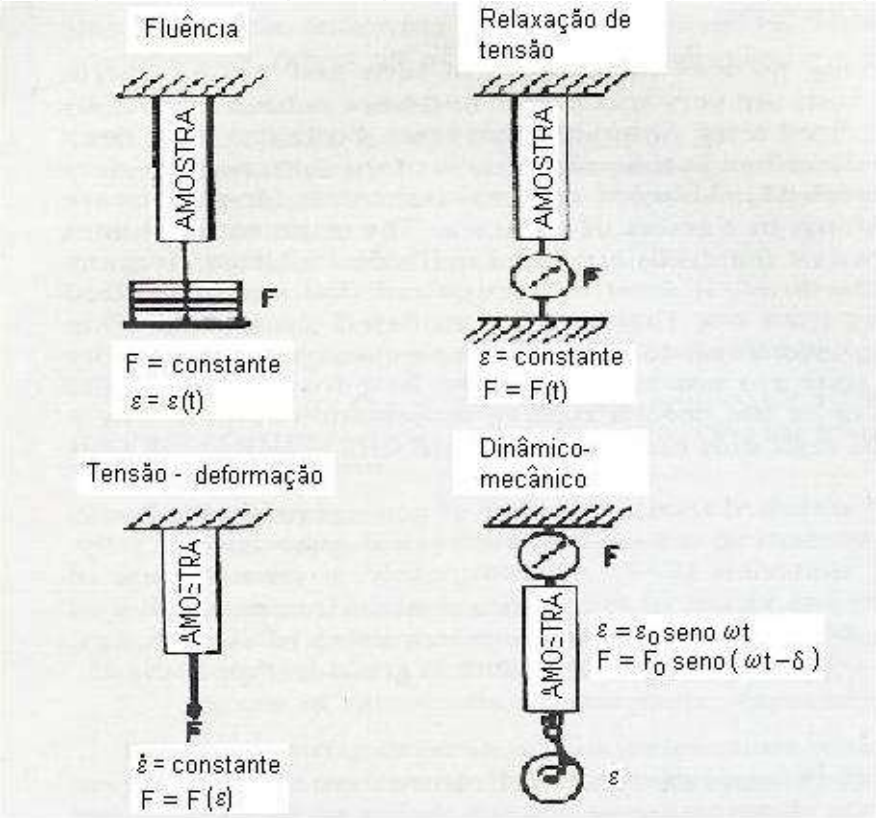
FUNDAMENTOS EM ESTRUTURA E PROPRIEDADES DE POLÍMEROS

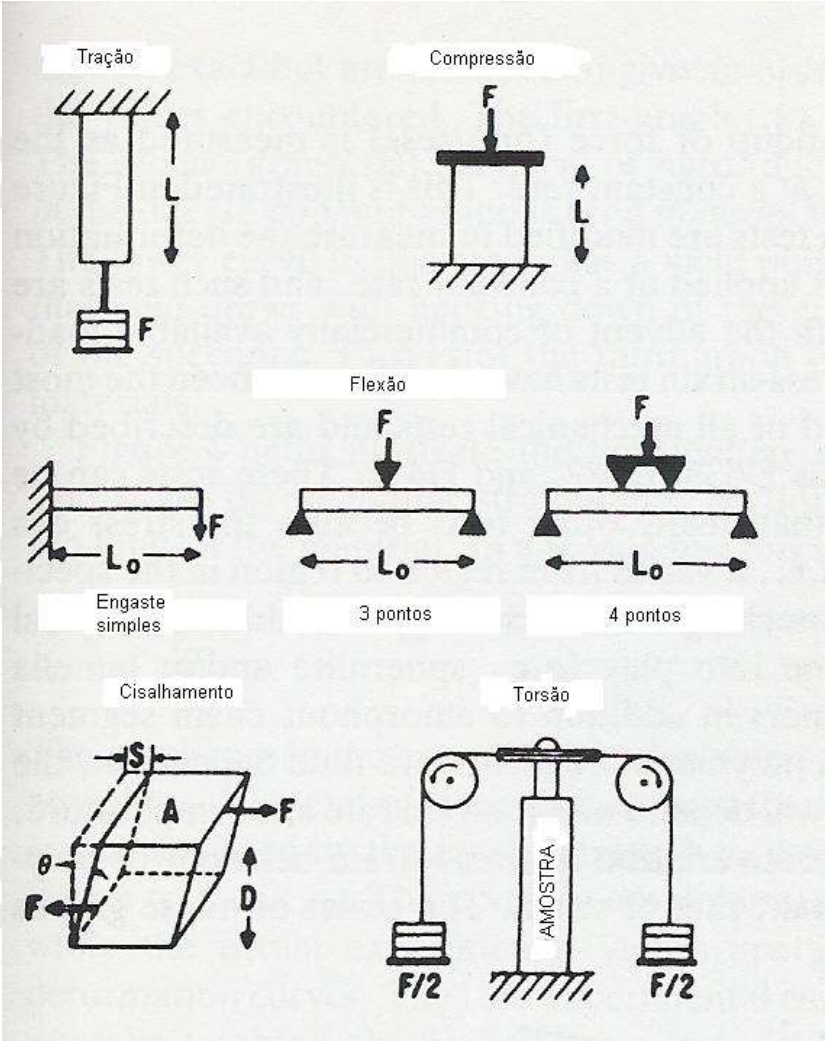
PROPRIEDADES MECÂNICAS

Profª Drª Wang Shu Hui

ENSAIOS MECÂNICOS



GEOMETRIAS DOS ENSAIOS MECÂNICOS



PROPRIEDADES MECÂNICAS

- As propriedades mecânicas de sólidos elásticos são classicamente descritas pela lei de Hooke, que estabelece que uma tensão aplicada é proporcional à deformação resultante e que é independente da taxa de deformação:

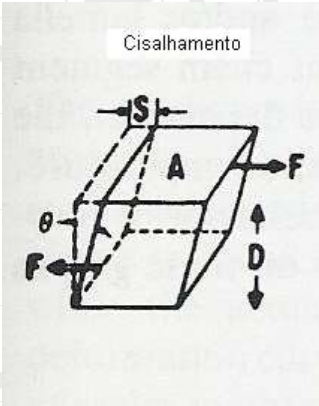
$$\sigma = E\varepsilon$$

onde: σ é a tensão aplicada; E é o módulo de elasticidade; e ε é a deformação.

(1) Para experimento de tensão (tração e compressão):

$$tensão\sigma = \frac{forçaF}{\text{sec}çãoretaA}$$

PROPRIEDADES MECÂNICAS



(2) Para experimento de cisalhamento:

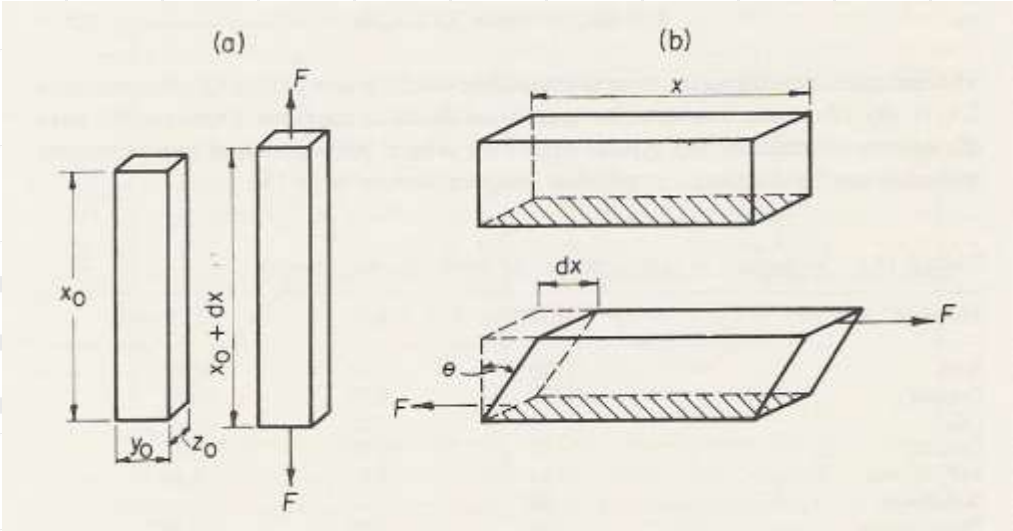
$$tensão\,de\,cisalha\,\sigma_s = \frac{força\,de\,cisalhamento\,F}{\text{sup}erfície\,de\,cisalhamento\,A}$$

(3) As propriedades dos líquidos submetidos a esforço mecânico são por sua vez descritas pela lei de Newton, em que a tensão é independente da deformação, mas proporcional à taxa de deformação:

$$\sigma_s = \eta \frac{d\varepsilon_s}{dt_s}$$

onde: σ_s é a tensão de cisalhamento; η é o coeficiente de viscosidade; e $\frac{d\varepsilon_s}{dt_s}$ é a taxa de cisalhamento, também representada como γ .

DEFORMAÇÃO



(a) Tração e

(b) Cisalhamento

A deformação ε pode ser definida, entre outras, como:

$$\varepsilon = \frac{dx}{x_0}$$

para a deformação de engenharia,

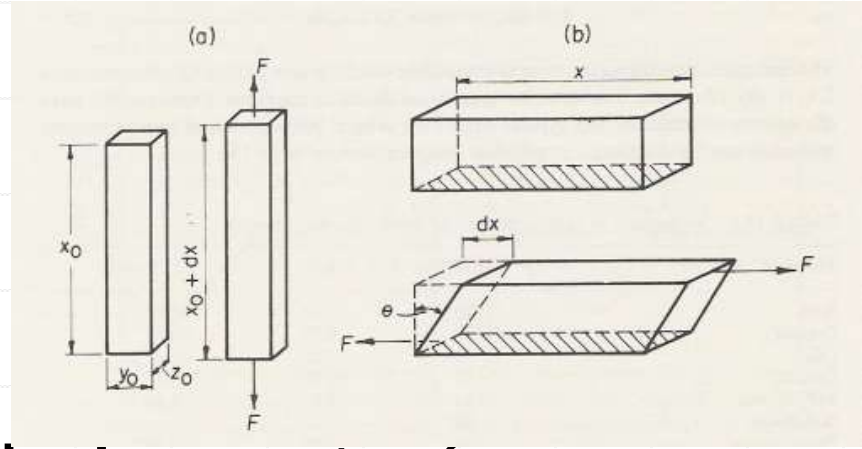
$$\varepsilon = \ln \frac{x}{x_0}$$

para a deformação real,

$$\varepsilon = \frac{1}{3}\left[\left(\frac{x}{x_0}\right) - \left(\frac{x_0}{x}\right)^2\right]$$

para a deformação obtida pela teoria cinética da elasticidade.

DEFORMAÇÃO



A deformação por extensão dx da amostra é acompanhada pelas contrações laterais dy e dz, que são negativas e normalmente assumidas como iguais a zero.

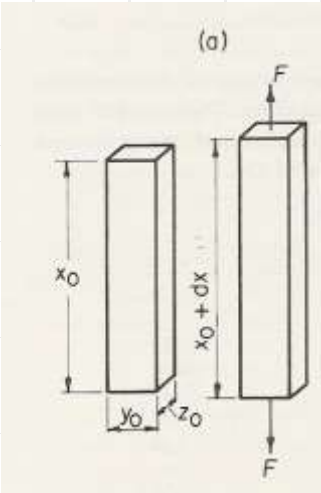
A deformação de cisalhamento γ é:

$$deformação de cisalhamento \gamma = \frac{deslocamento de cisalhamento dx}{distância entre as superfícies D} = tg\theta$$

RAZÃO DE POISSON

Para um corpo isotrópico, a variação de comprimento por unidade de comprimento está relacionada a variação de largura por unidade de largura, de tal forma que :

$$v_p = \frac{\frac{dy}{y_0}}{\frac{dx}{x_0}}$$



em que v_p é conhecido como a razão de Poisson e varia de 0,5, quando não ocorre mudança no volume, até 0,2.

RAZÃO DE POISSON

Para sólidos isotrópicos, tem-se a seguinte relação entre os módulos de elasticidade de tração E e de cisalhamento G:

$$E = 2(1+\nu_p)G$$

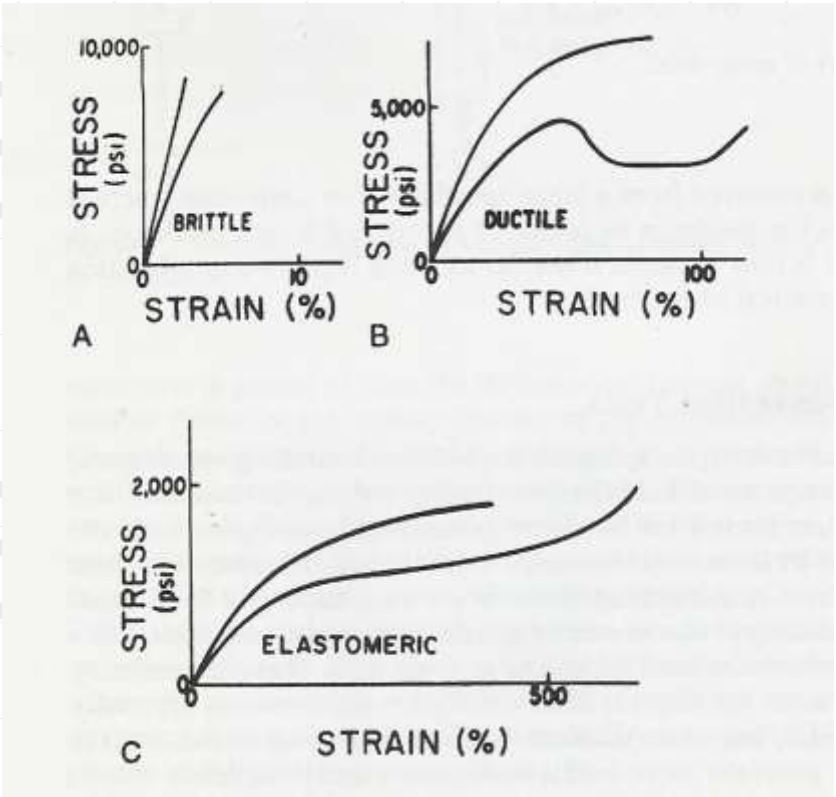
Para sólidos incompressíveis ou ideais (ν_p= 0,5) e a relação torna-se:

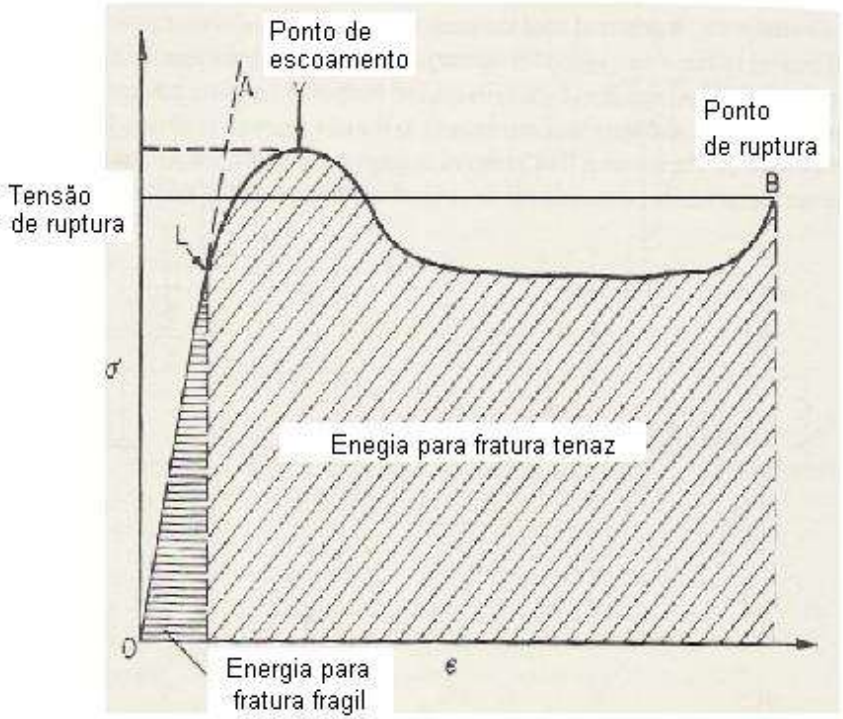
$$E = 3G$$

COMPARAÇÃO DOS MÓDULOS DE MATERIAIS

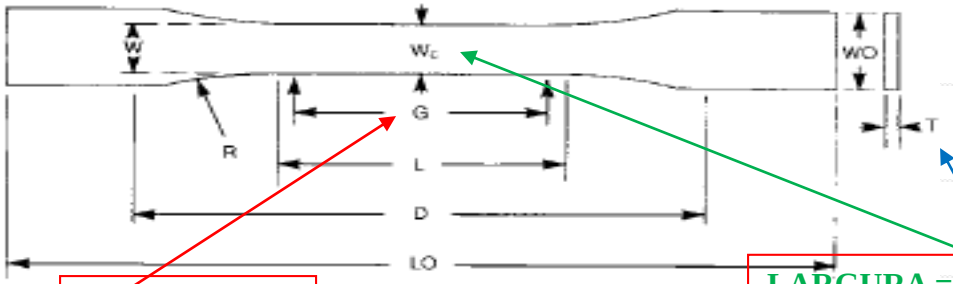
MATERIAL	E (GPa)	G (GPa)	v_P
AÇO	220	85,9	0,28
COBRE	120	44,4	0,35
VIDRO	60	24,4	0,23
GRANITO	30	15,5	0,30
POLIESTIRENO	34	1,28	0,33
POLIAMIDA 6.6	20		
POLIETILENO	24	0,087	0,38
BORRACHA NATURAL	0,02	0,00067	0,49

ENSAIO DE TRAÇÃO





ASTM D638 - CORPOS DE PROVAS

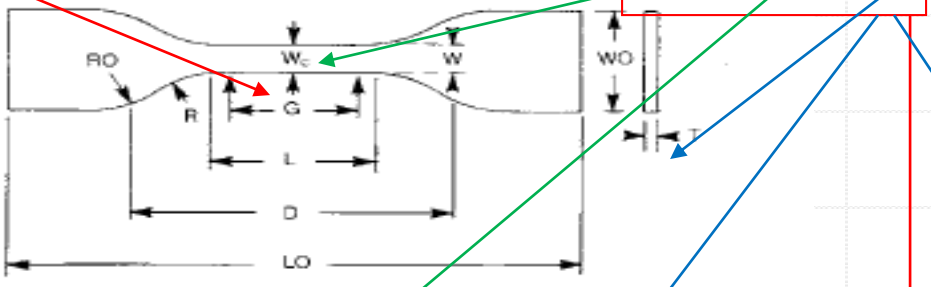


TYPES I, II, III & V

L_O = GAUGE

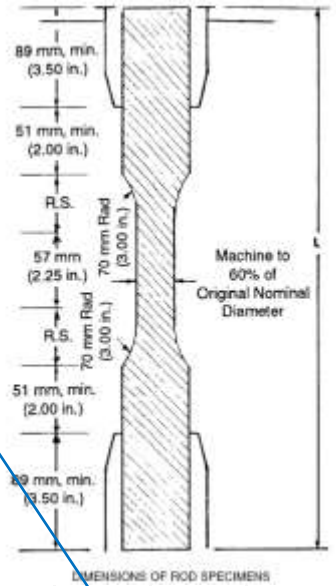
LARGURA = W

ESPESSURA = T



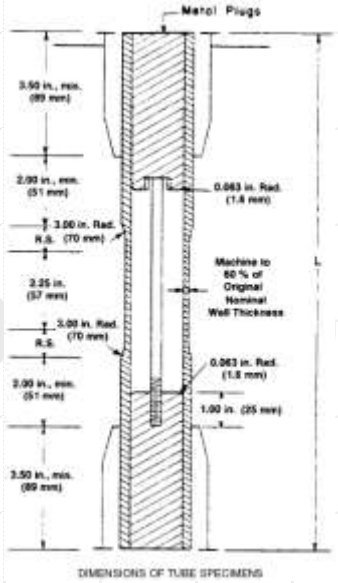
TYPE IV

MENOS USUAIS



DIMENSIONS OF ROD SPECIMENS

CILÍNDRICOS



DIMENSIONS OF TUBE SPECIMENS

TUBULARES

Specimen Dimensions for Thickness, *T*, mm (in.)[A]

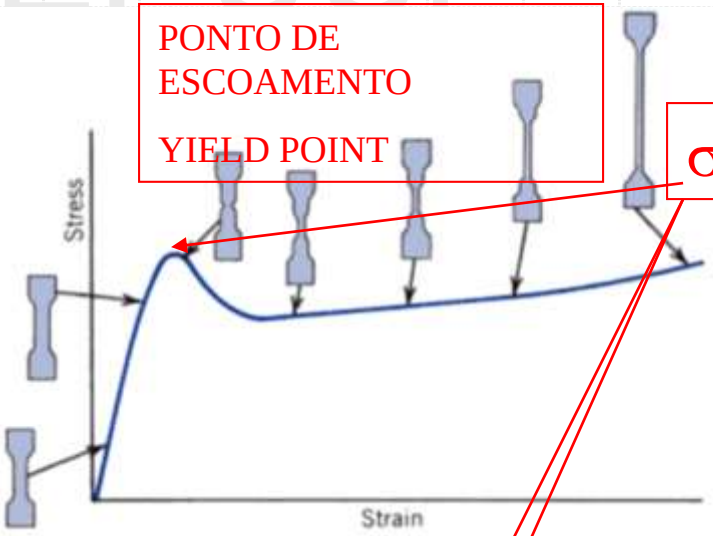
Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV[B]	Type V[C,D]	
W—Width of narrow section[E,F]	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02)[B,C]
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02)[C]
WO—Width overall, min[G]	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO—Width overall, min[G]	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO—Length overall, min[H]	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G—Gage length[I]	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010)[C]
G—Gage length[I]	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5)[J]	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04)[C]
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

CURVAS DE TRAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS

PONTO DE ESCOAMENTO

YIELD POINT

σ_y



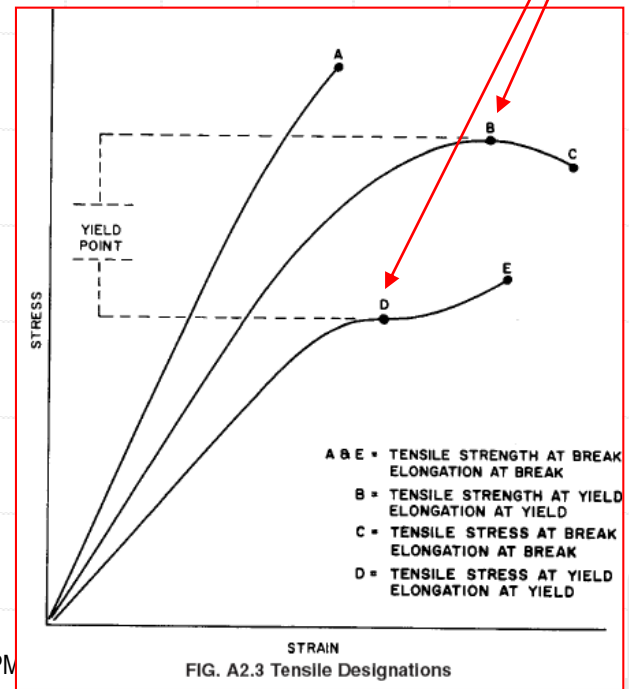


FIG. A2.3 Tensile Designations

Final de deformação elástica

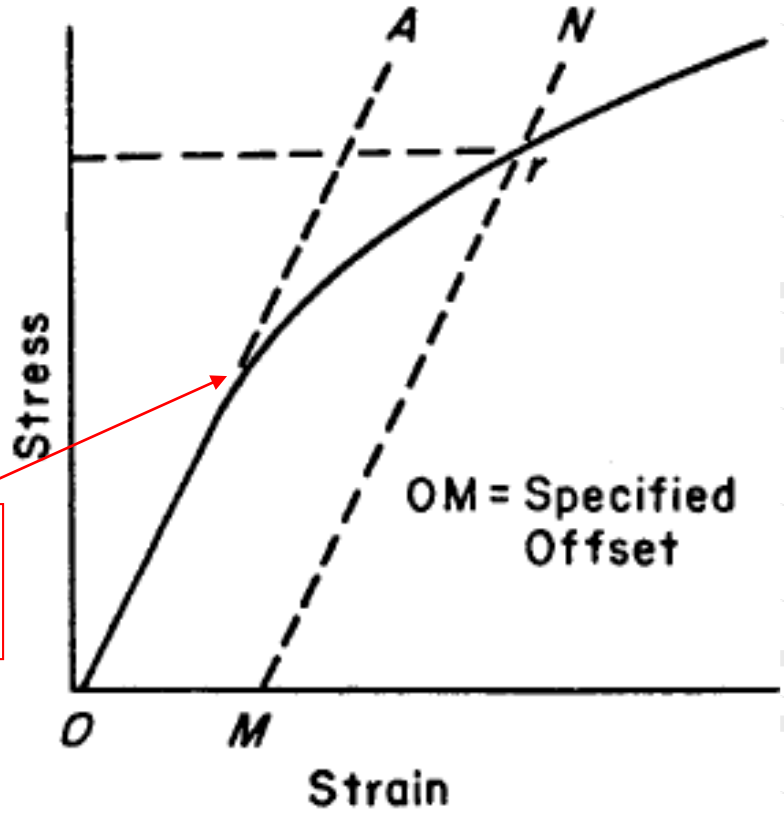


FIG. A2.1 Offset Yield Strength

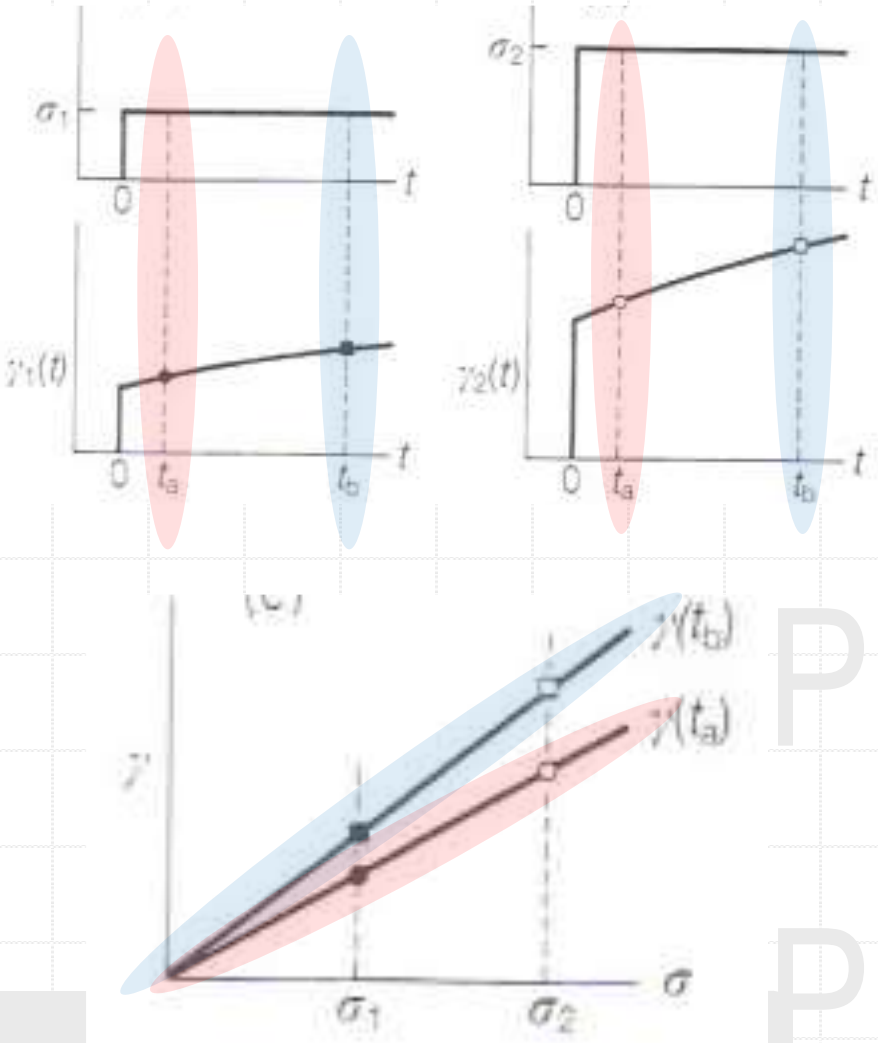
NÃO SE OBSERVA PONTO FORMAL DE ESCOAMENTO

A NATUREZA DA VISCOELASTICIDADE

- FLUÊNCIA

Em duas condições distintas de APLICAÇÃO DE TENSÃO σ_1 e σ_2 são observadas duas curvas de deformação $\gamma_1(t)$ e $\gamma_2(t)$ em função do tempo t. Em tempo arbitrário t, as tensões e deformações apresentam proporcionalidade, de modo que define-se então a compliança J(t) no tempo t.

$$J(t) = \frac{\gamma_1(t)}{\sigma_1} = \frac{\gamma_2(t)}{\sigma_2}$$



FLUÊNCIA

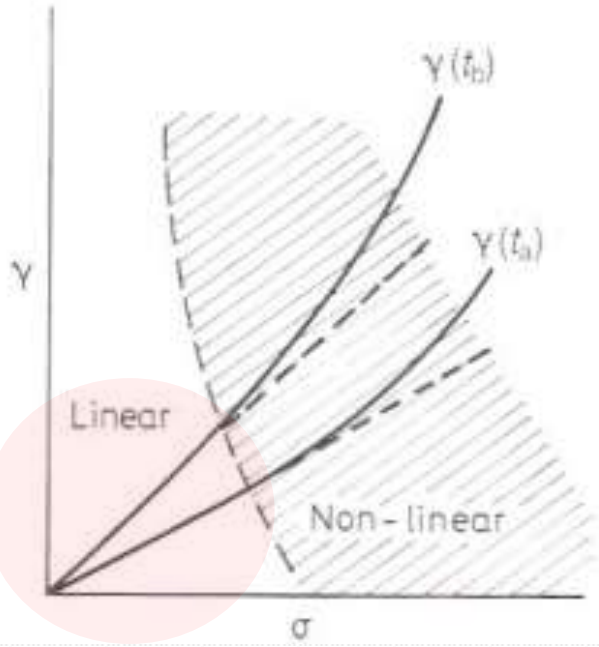
♦ FLUÊNCIA VISCOELÁSTICA LINEAR

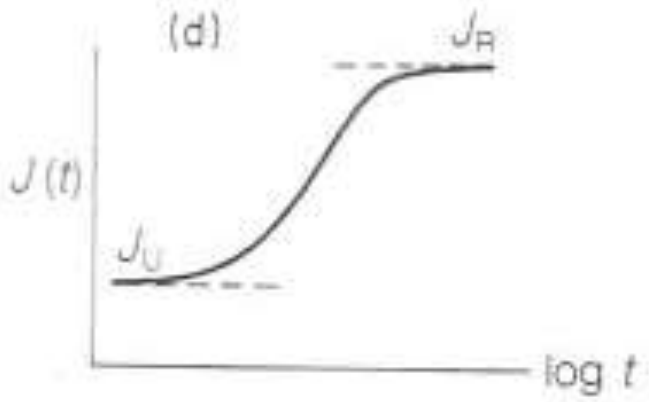
Quando para um valor de tensão σ, observa-se a relação

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma}$$

Normalmente observada em baixas tensões com deformações inferiores a 0,005.

J(t) é medida em função de décadas de unidades de tempo e em tempos muito longos e muito curtos apresenta pouca variação (ou mesmo nenhuma variação em função do tempo.





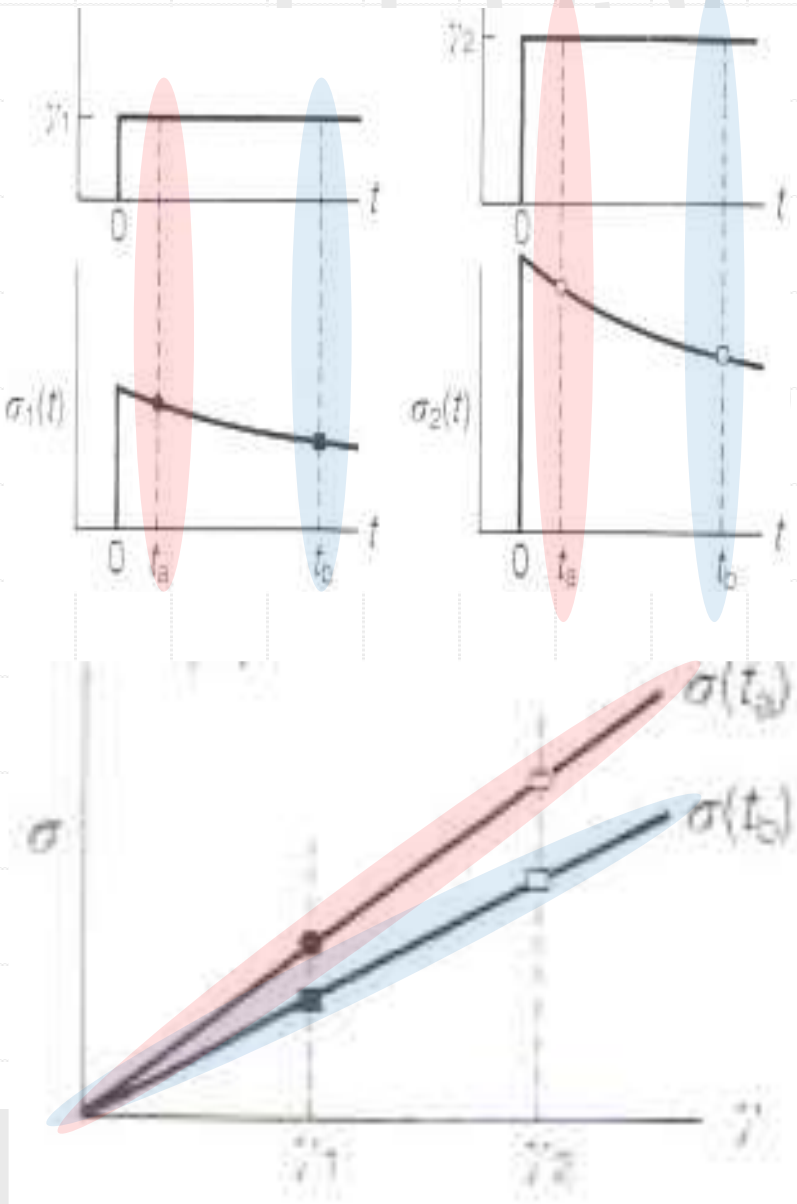
J_U – compliança não-relaxada
J_R – compliança relaxada

RELAXAÇÃO DE TENSÃO

- RELAXAÇÃO DE TENSÃO

Em duas condições distintas de DEFORMAÇÃO γ_1 e γ_2 são observadas duas curvas de relaxação de tensão σ_1 (t) e σ_2 (t) em função do tempo t. Em tempo arbitrário t, as tensões e deformações apresentam proporcionalidade, de modo que define-se então o módulo de relaxação G(t) no tempo t.

$$G(t) = \frac{\sigma_1(t)}{\gamma_1} = \frac{\sigma_2(t)}{\gamma_2}$$



RELAXAÇÃO DE TENSÃO

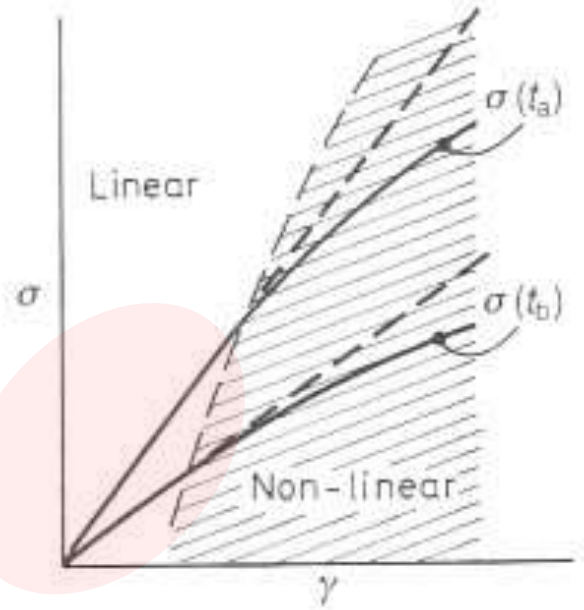
- RELAXAÇÃO DE TENSÃO VISCOELÁSTICA LINEAR

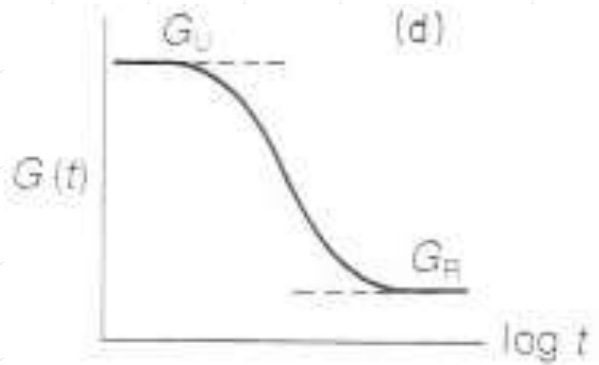
Quando para um valor de deformação γ, observa-se a relação

$$G(t) = \frac{\sigma(t)}{\gamma}$$

Normalmente observada em baixas deformações inferiores a 0,005.

G(t) é medida em função de décadas de unidades de tempo e em tempos muito longos e muito curtos apresenta pouca variação (ou mesmo nenhuma variação em função do tempo.





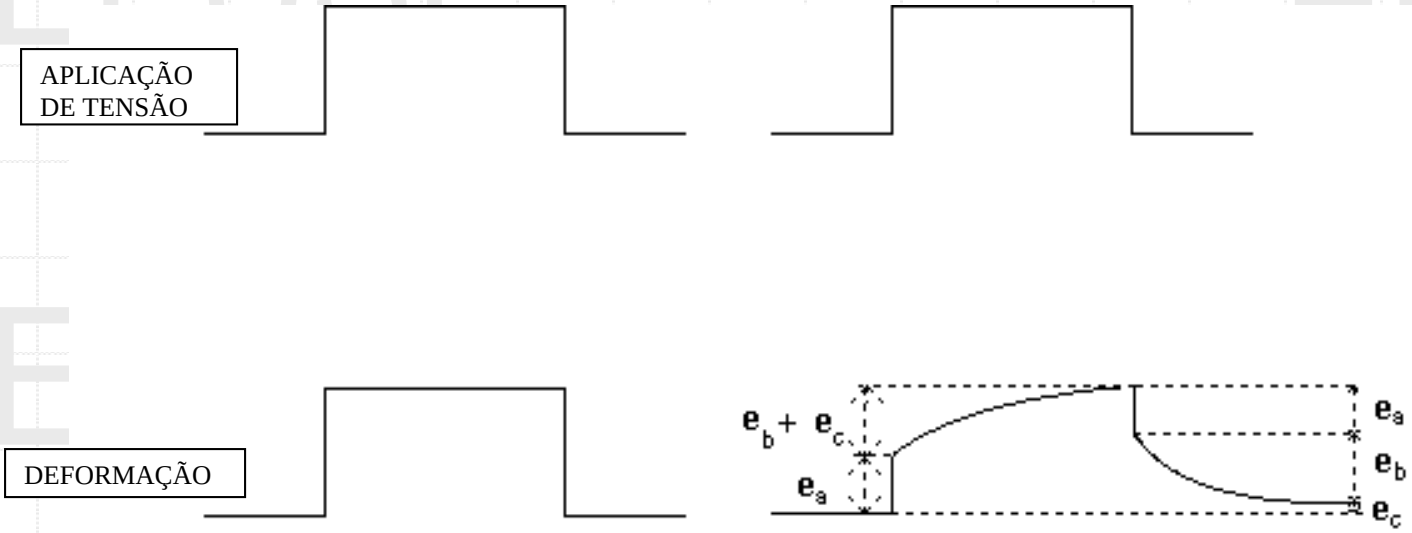
G_U – módulo não-relaxado
G_R – módulo relaxado

PROPRIEDADES DOS POLÍMEROS A PARTIR DE EXPERIMENTOS IDEALIZADOS

- Relaxação de tensão
- Fluência
- Testes dinâmicos

MODELOS MECÂNICOS QUE DESCREVEM VISCOELASTIDADE

COMPORTAMENTO SOB TENSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO

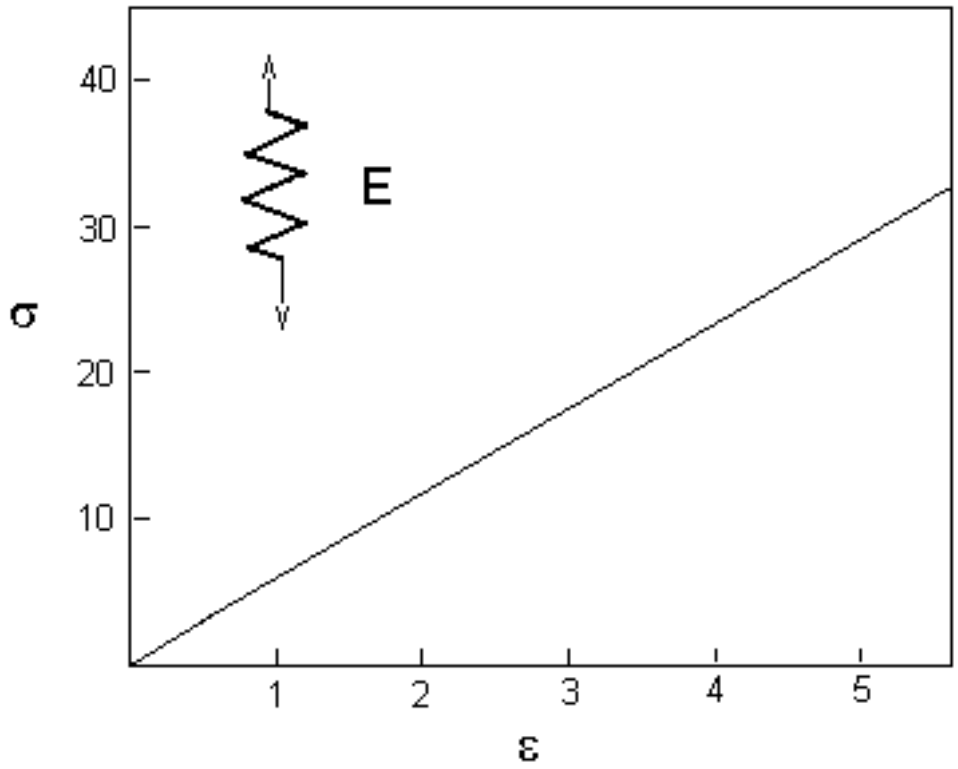


e_a – deformação elástica imediata – recuperável

e_b – deformação elástica retardada - recuperável

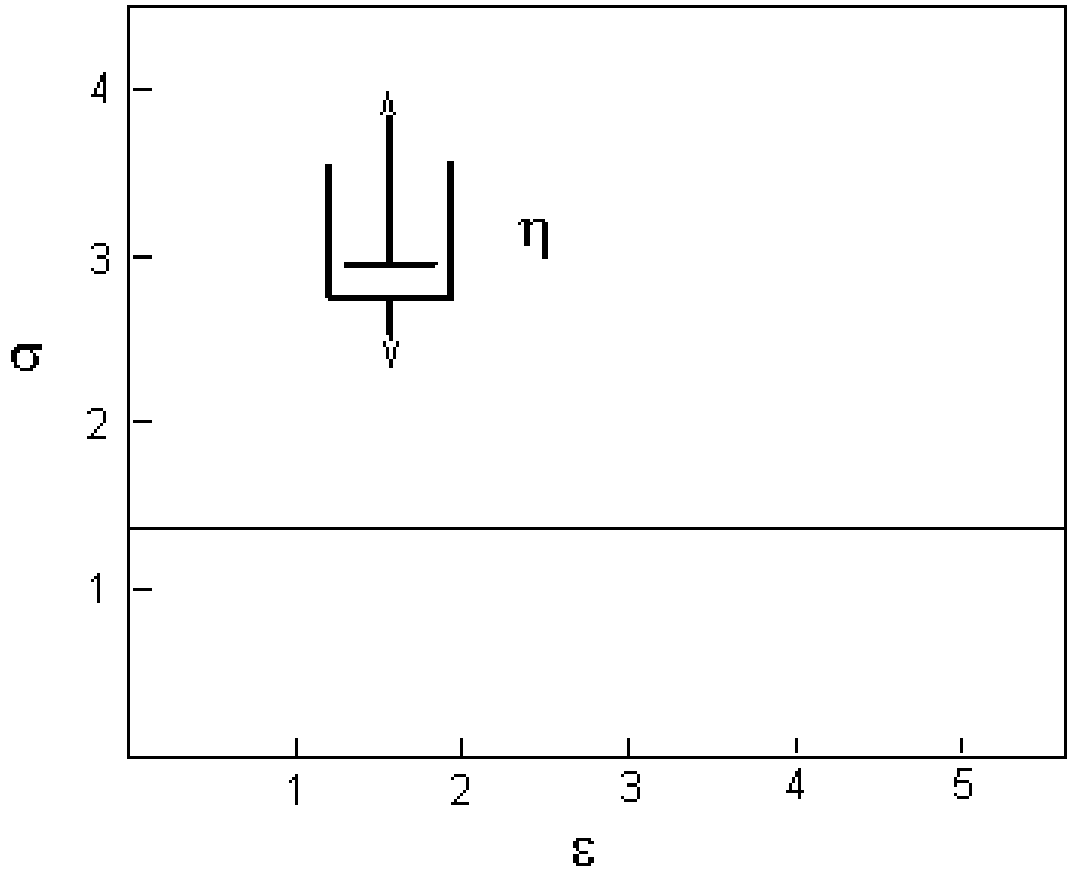
e_a – deformação por escoamento plástico – deformação permanente

SÓLIDO PERFEITAMENTE ELÁSTICO – LEI DE HOOKE



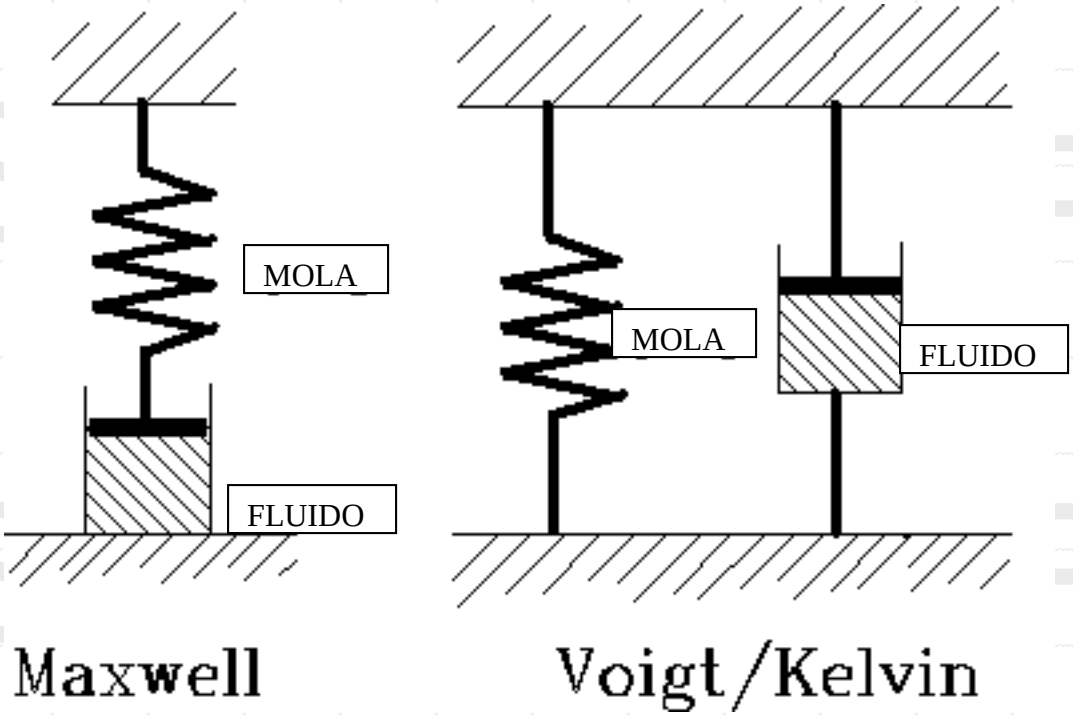
$$\sigma = E\,\varepsilon$$

FLUIDO NEWTONIANO



$$\sigma_s = \eta \, d\varepsilon_s/dt$$

MODELOS MECÂNICOS



MODELO MAXWELL (MAIS SIMPLES) DE TENSÃO EM POLÍMERO

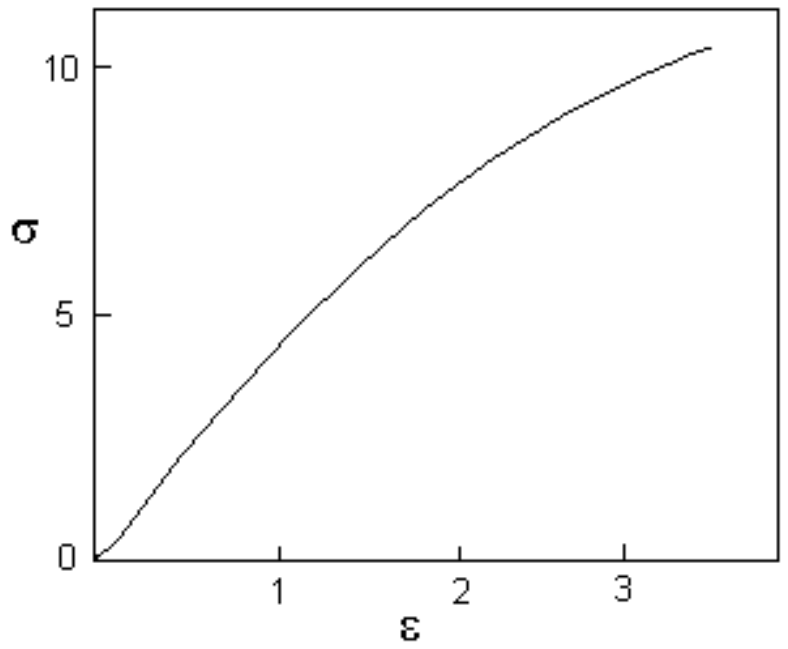
UM COMPONENTE HOOKEANO

UM COMPONENTE NEWTONIANO

Em SÉRIE

O modelo é utilizado para descrever um ensaio de **RELAXAÇÃO DE TENSÃO**:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \, d\varepsilon/dt$$



RELAXAÇÃO DE TENSÃO

A tensão σ é imposta para uma deformação fixa ε.
A deformação total num modelo de Maxwell é aditiva:

$\varepsilon = \varepsilon_{elast} + \varepsilon_{visc}$

para cisalhamento: $d\varepsilon/dt = (1/G)(d\sigma/dt) + \sigma/\eta$ $G = \sigma_s/\varepsilon_s$
para tração: $d\varepsilon/dt = (1/E)(d\sigma/dt) + \sigma/\eta$ $E = \sigma/\varepsilon$

onde G é módulo de cisalhamento e E é módulo de elasticidade.
Considerando uma deformação constante ($d\varepsilon/dt = 0$):

para cisalhamento: $d\sigma/dt + G\,\sigma/\eta = 0$ ou $d\sigma/dt = -G\,\sigma/\eta$
para tração: $d\sigma/dt + E\,\sigma/\eta = 0$ ou $d\sigma/dt = -E\,\sigma/\eta$

Integrando e tomando a tensão inicial igual a tensão imposta σ_o

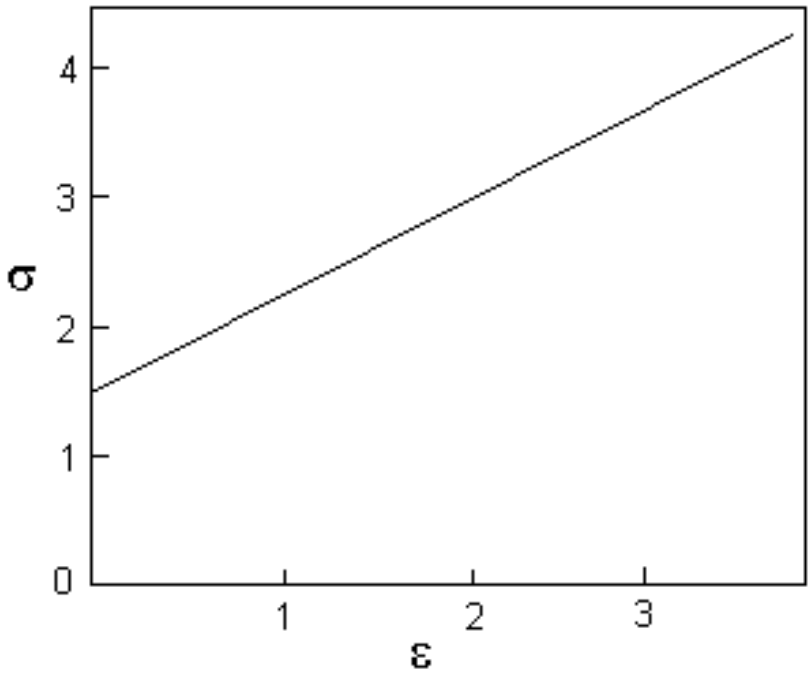
para cisalhamento: $\sigma = \sigma_o \exp(-t\,G/\,\eta)$
para tração: $\sigma = \sigma_o \exp(-t\,E/\,\eta)$
Quando $t = \eta/G$ (ou $t = \eta/E$) ; o valor original da tensão fica reduzida em 1/e (e = 2,718) e o tempo t é conhecido como ***tempo de relaxação***.

MODELO VOIGT-KELVIN DE TENSÃO EM POLÍMERO

UM COMPONENTE HOOKEANO

UM COMPONENTE NEWTONIANO

Em paralelo



Os componentes em paralelo partilham a tensão aplicada e ambos são sujeitos à mesma deformação.

ENSAIO DE FLUÊNCIA - *CREEPING*

Os componentes MOLA e FLUIDO são sujeitos a mesma deformação

$J(t) = \varepsilon_s/\sigma_s$

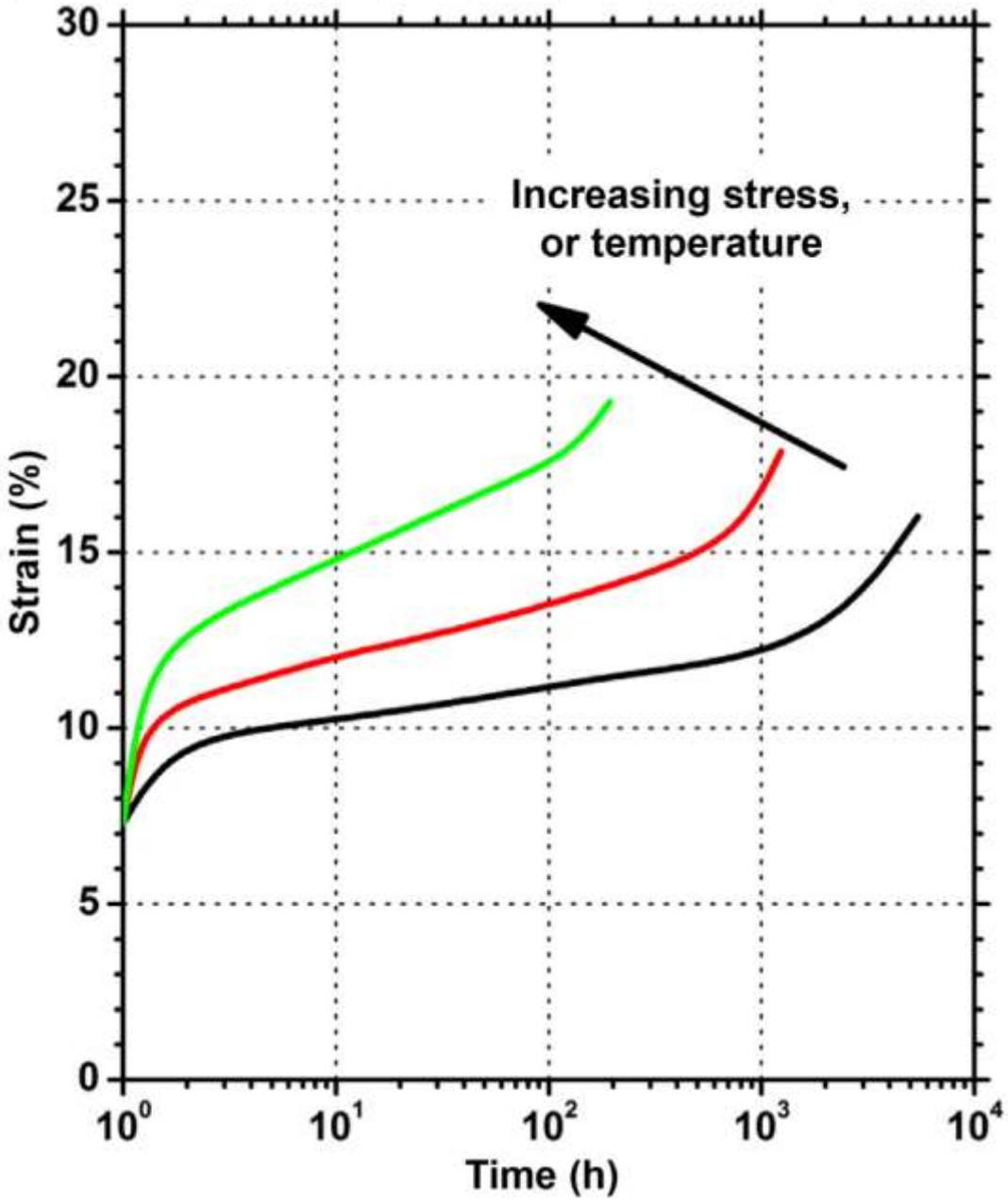
$D(t) = \varepsilon/\sigma$

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 J\left[1 - e^{\frac{\tau}{\tau_R}}\right]$$

Onde $\tau_R = \eta/G$ é o ***tempo de retardação*** e é o intervalo de tempo entre a aplicação da tensão e a deformação.

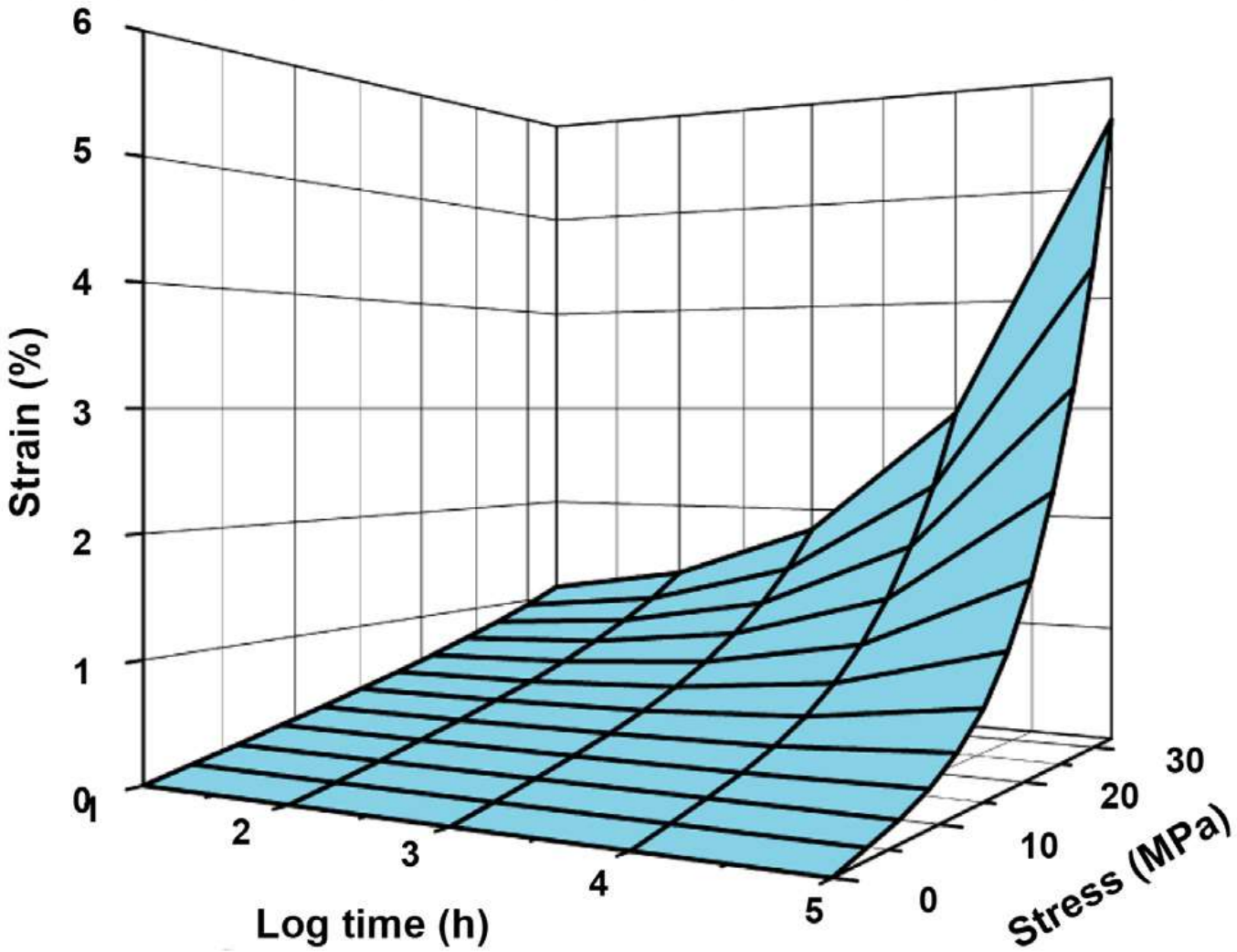
Quanto maior a viscosidade maior é o tempo de retardação e o tempo representa o tempo necessário para atingir [1- (1/e)] (ou 0,632) da deformação de equilíbrio.

Curvas de Fluência a diferentes tensão ou temperaturas



Laurence W. McKeen. The Effect of Creep and other Time Related Factors on Plastics and Elastomers. Chapter 1, 3rd Ed. Elsevier 2015

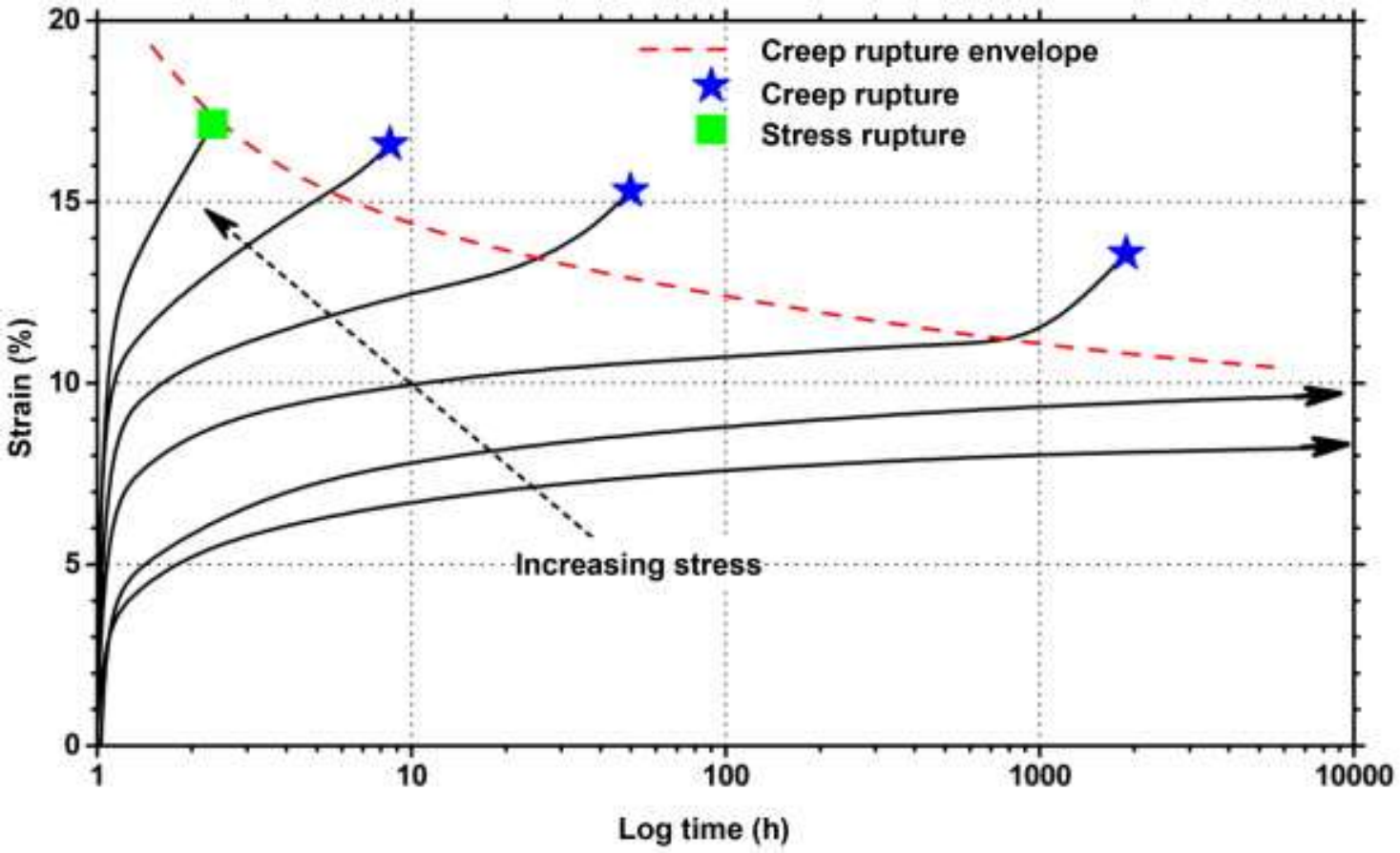
Curvas de Fluência sob diferentes valores de tensão



Superfície hipotética para a relação *fluência de ruptura(creep rupture)* – tensão (creep stress) – tempo.

Laurence W. McKeen. The Effect of Creep and other Time Related Factors on Plastics and Elastomers. Chapter 1, 3rd Ed. Elsevier 2015

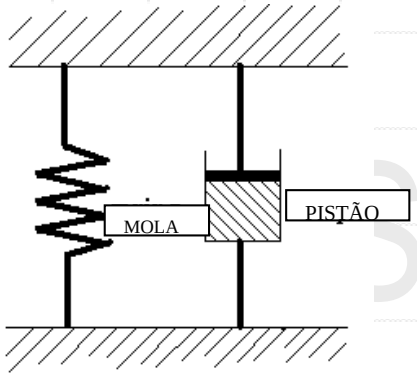
Curvas de Fluência sob diferentes valores de tensão



Tensão de rupture (stress rupture) definida como tensão e deformação no início do terceiro estágio da fluência. *Fluência de ruptura(creep rupture)* extensão da fluência através do estágio III até a rupture. Envelope de fluência de ruptura (creep rupture envelope) conjunto de valores de tensão e tempo correspondente para falha.

Laurence W. McKeen. The Effect of Creep and other Time Related Factors on Plastics and Elastomers. Chapter 1, 3rd Ed. Elsevier 2015

Curvas de Tensão de fluência a temperaturas



Voigt/Kelvin

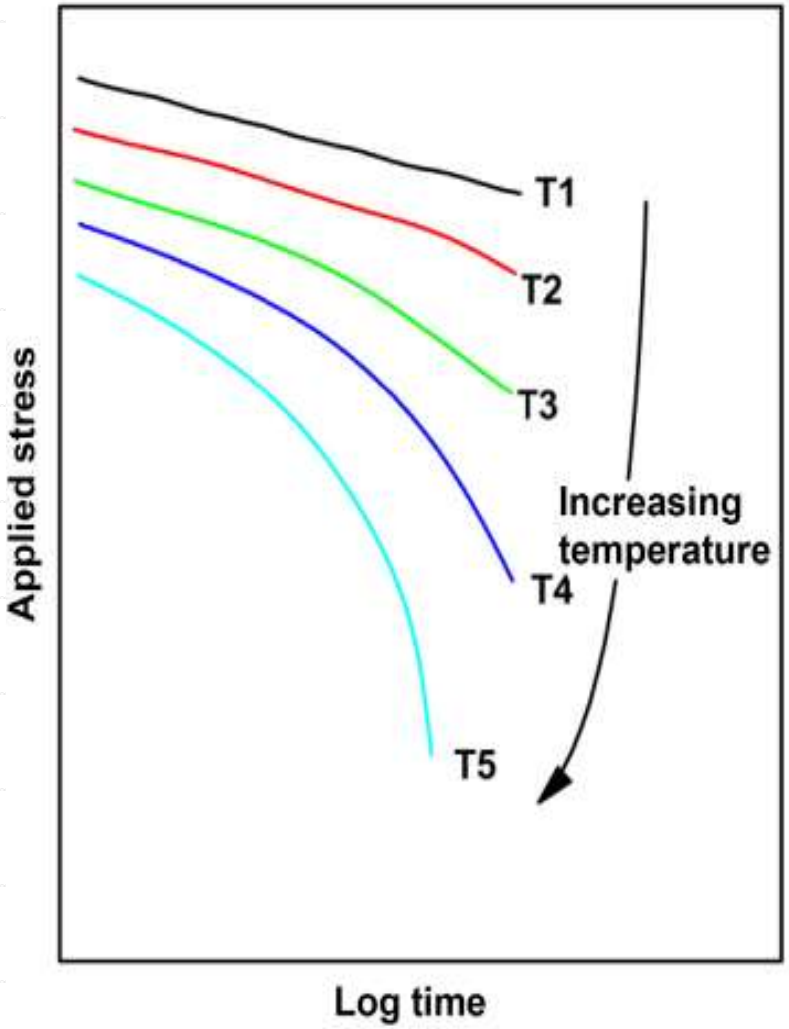
$$\varepsilon(t) = \sigma_0 J\left[1 - e^{\frac{\tau}{\tau_R}}\right]$$

G e η são sensíveis a variação da temperatura.

$$\tau_R = \eta/G$$

G(t) e σ(t) se reduzem com o tempo em cada temperatura.

Em temperatura maior, o tempo de retardação é menor τ_R, e são menores G(t) e σ(t).

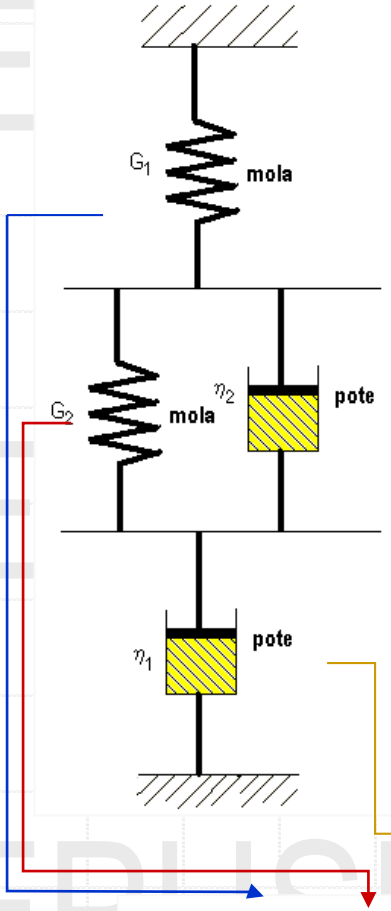


Laurence W. McKeen. The Effect of Creep and other Time Related Factors on Plastics and Elastomers. Chapter 1, 3rd Ed. Elsevier 2015

Modelo de 4 elementos

modelo para descrever FLUÊNCIA

aplica-se uma tensão σ_o e observa-se $\varepsilon(t)$



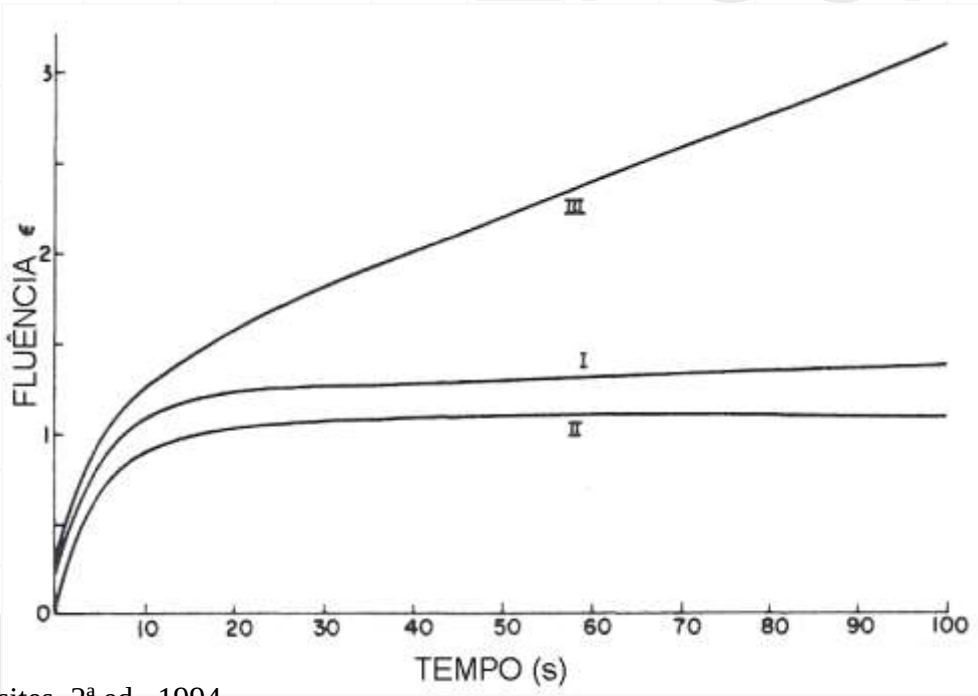
σ_o = tensão aplicada em t = 0 s

Curva	G_1 (dinas/cm^2)	η_1 (P)	G_2 (dinas/cm^2)	η_2 (P)	σ_o (dinas/cm^2)
I	5×10^9	5×10^{11}	10^9	5×10^9	10^9
II	10^{11}	5×10^{11}	10^9	5×10^9	10^9
III	5×10^9	5×10^{10}	10^9	5×10^9	10^9

G e η são sensíveis a variação da temperatura.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

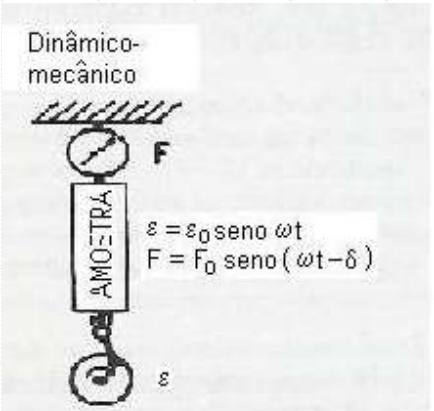
$$\varepsilon = \frac{\sigma_o}{G_1} + \frac{\sigma_o}{G_2}\left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_R}}\right] + \frac{\sigma_o}{\eta_1} t$$



Nielsen& Landel, Mechanical poperties of polymers and composites, 2ª ed., 1994

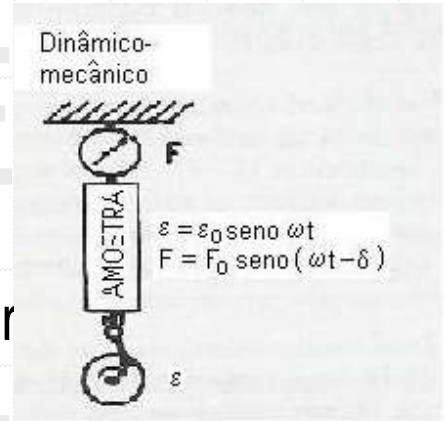
ANÁLISE TÉRMICA DINÂMICO-MECÂNICA
DMTA OU DMA

- O termo dinâmico se refere ao fato da técnica de ensaio envolver uma variação de condição de análise, isto é, ocorre uma aplicação de uma deformação ou de uma tensão oscilatória à amostra que provoca uma movimentação molecular enquanto o sistema é submetido a um aumento de temperatura durante o experimento. A temperatura também pode ser mantida constante enquanto a freqüência de oscilação é modificada. Independentemente, a energia de deformação mecânica gerada pode ser armazenada elasticamente ou dissipada como energia térmica (através de movimento molecular) durante o ciclo de deformação mecânica.

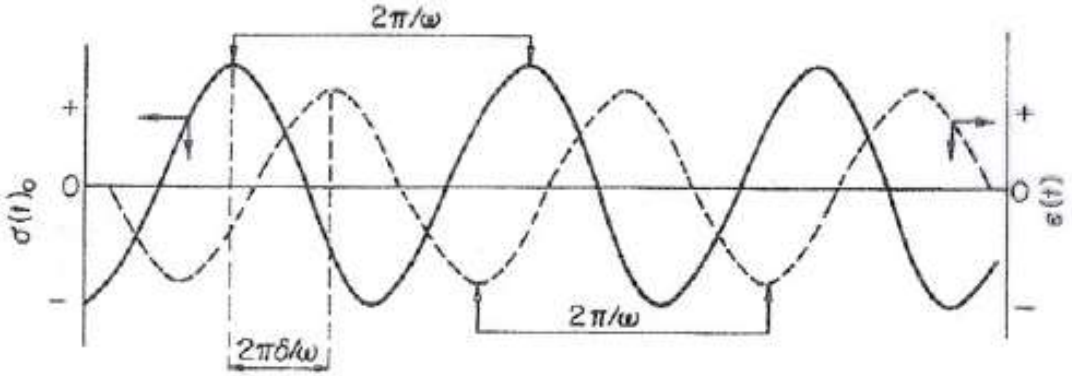


ANÁLISE TÉRMICA DINÂMICO-MECÂNICA
DMTA OU DMA

- Os materiais poliméricos submetidos a deformações oscilatórias mecânicas forçadas manifestam um comportamento viscoelástico. O comportamento viscoelástico varia com a freqüência de deformação.



- Os parâmetros característicos utilizados para quantificar as propriedades viscoelásticas dinâmicas são primariamente o E' (ou G'), módulo de armazenamento ou módulo de elasticidade dinâmico, E" (ou G"), módulo de perda, e tg δ, que é a tangente do ângulo da diferença de fase, isto é, E"/E' (ou G"/G').



Representação gráfica de aplicação de tensão oscilatória (σ) (linha cheia) com deformação oscilatória (ε) resultante com ângulo de fase δ (linha tracejada).

Em ensaio de tensão a **deformação** é:

$\varepsilon = \varepsilon_o \text{ seno } \omega t$ (1)

e a **tensão**:

$\sigma = \sigma_o \text{ seno}(\omega t + \delta)$ ou expandindo: (2)

$\sigma = (\sigma_o \cos \delta) \text{ seno } \omega t + (\sigma_o \text{ seno } \delta) \cos \omega t$ (3)

A deformação aparece defasada de ângulo δ, após a tensão. Na decomposição vetorial a tensão apresenta dois componentes: um em fase com a deformação (σ_o cosδ); e o outro defasado90º (σ_o seno δ).

A relação entre a tensão e deformação, no regime de deformação elástica, nesse ensaio dinâmico pode ser descrita como:

$$\sigma = \varepsilon_o [E' \text{ seno } \omega t + E'' \cos \omega t] \quad (4)$$

As equações (3) e (4) fornecem as relações:

$$E' = \frac{\sigma_o \cos \delta}{\varepsilon_o} \quad (5) \qquad E'' = \frac{\sigma_o \text{ seno } \delta}{\varepsilon_o} \quad (6)$$

O componente da tensão $E'\varepsilon_o$ está em fase com a deformação; e o componente $E''\varepsilon_o$ está fora de fase em 90º.

Utilizando a representação complexa para vetores temos:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_o \, e^{i\omega t} \qquad (7)$$

$$\sigma^* = \sigma_o \, e^{i(\omega t + \delta)} \qquad (8)$$

O módulo complexo é então:

$$E^* = \sigma^*/\varepsilon^* \qquad (9)$$

$$E^* = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} e^{i\delta}$$

$$E^* = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} (\cos \delta + i \, \text{seno} \, \delta) \qquad (10)$$

$$E^* = E' + i E'' \qquad (11)$$

E' é considerada a parte real do módulo e E" a parte imaginária.

$E^* = E' + i E''$ (11)

E' é considerada a parte real do módulo e E" a parte imaginária.

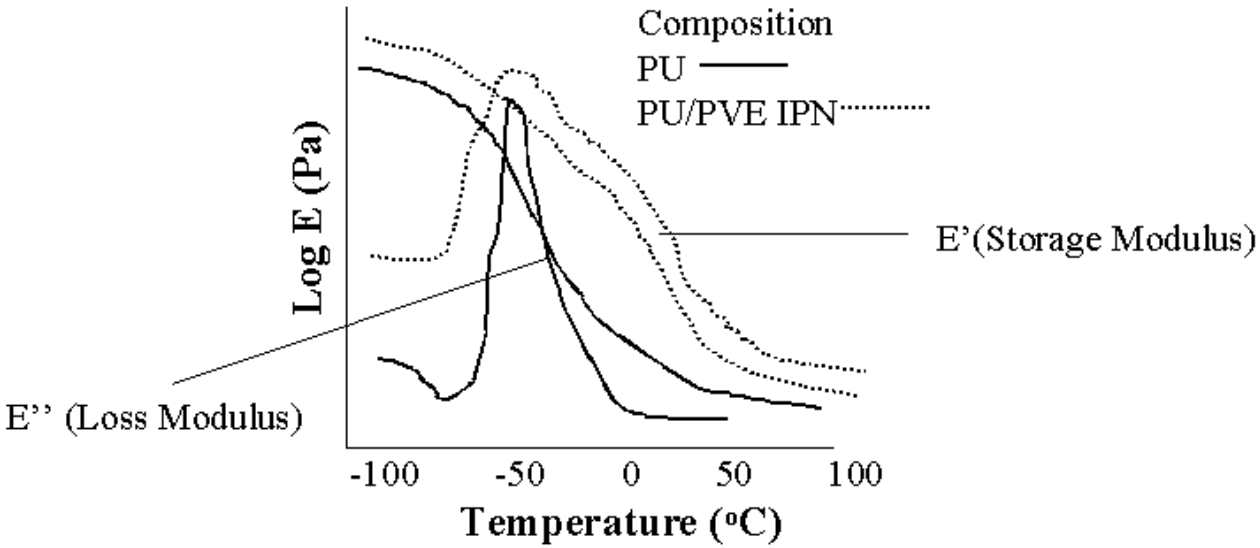
Note que a relação entre os módulos de perda e armazenamento é:

$tg\ \delta = E''/E'$ (12)

Para sólidos puramente elásticos a tg δ é igual a zero. Metais, por exemplo, estão muito próximo de atingir este comportamento. Os materiais com baixa capacidade de amortecimento, por exemplo cristais, têm esse comportamento, enquanto nos polímeros podemos observar o fenômeno de amortecimento em diferentes condições.

DMTA

Polyurethane/Polyvinylester System



DMTA

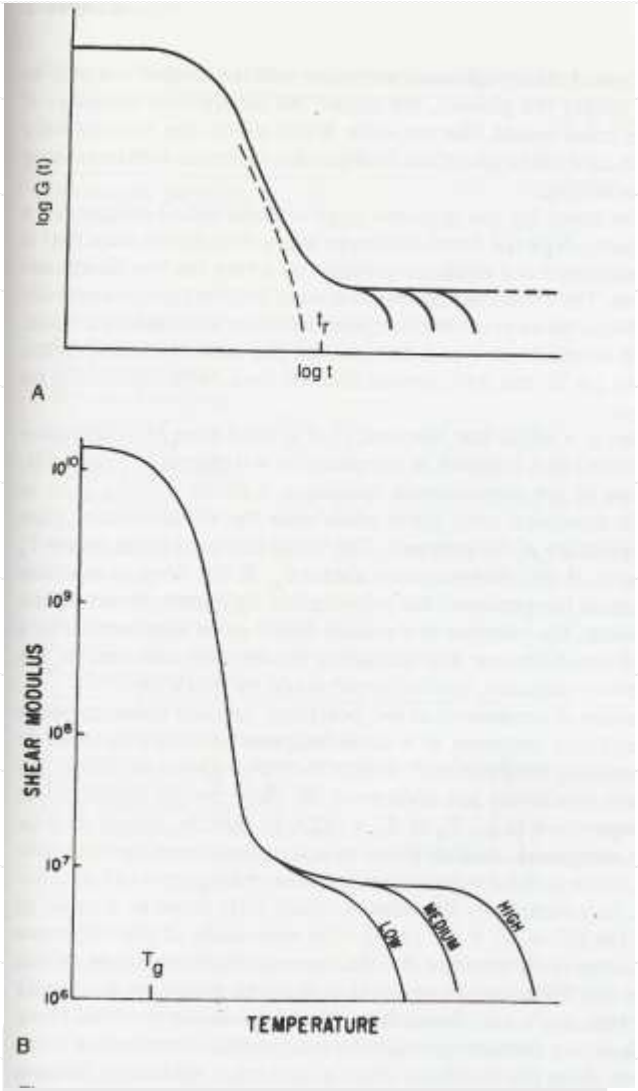
- A habilidade do material armazenar e dissipar energia mecânica é função da temperatura e do tempo.
- Durante uma relaxação mecânica, a freqüência da movimentação molecular entra em ressonância com a freqüência do ciclo da deformação mecânica oscilatória.
- DMTA testa as propriedades macroscópicas do material.
- Para polímeros, muitas relaxações podem ocorrer devido ao tamanho, arquitetura, arranjo especial, e interações entre as cadeias poliméricas.

PROPRIEDADES MECÂNICAS

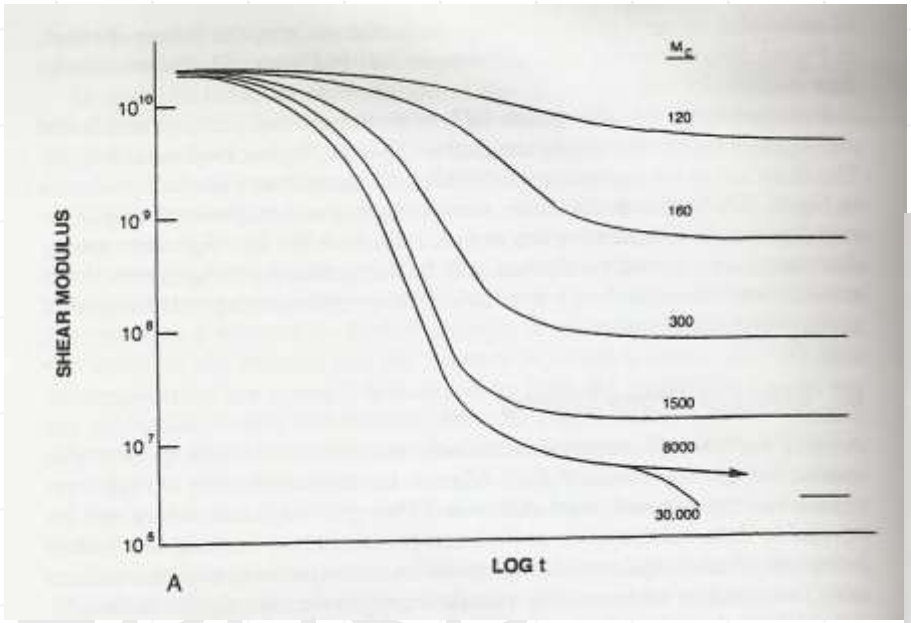
- MÓDULO DE ELASTICIDADE E ESTRUTURA DO POLÍMERO

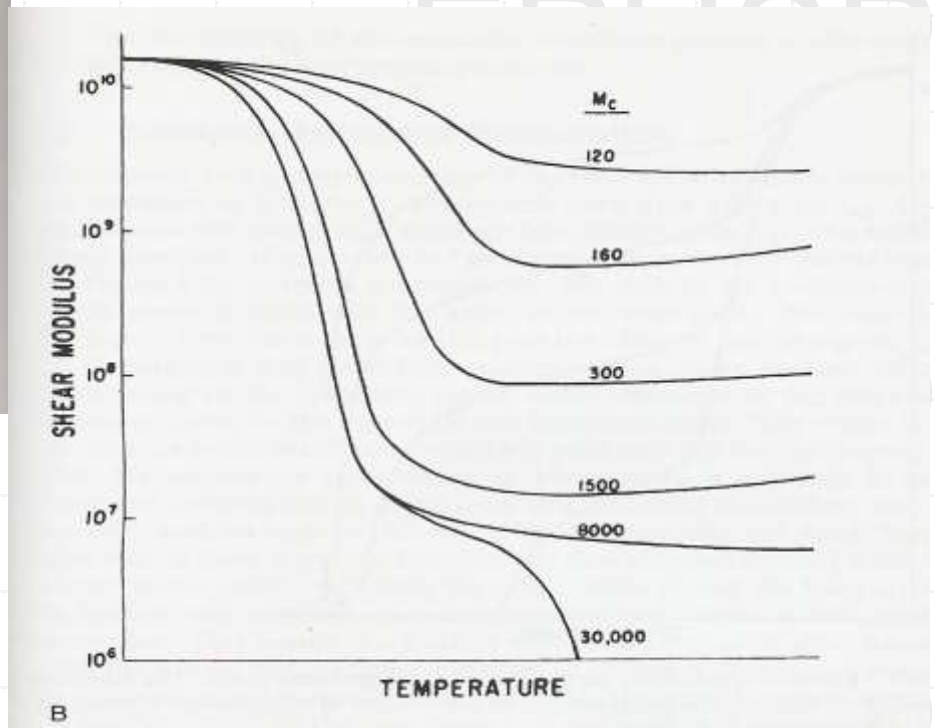
- MASSA MOLAR
- RETICULAÇÃO
- CRISTALINIDADE
- COPOLIMERIZAÇÃO
- PLASTIFUCAÇÃO
- COPOLÍMEROS SEGMENTADOS E BLENDAS

MASSA MOLAR

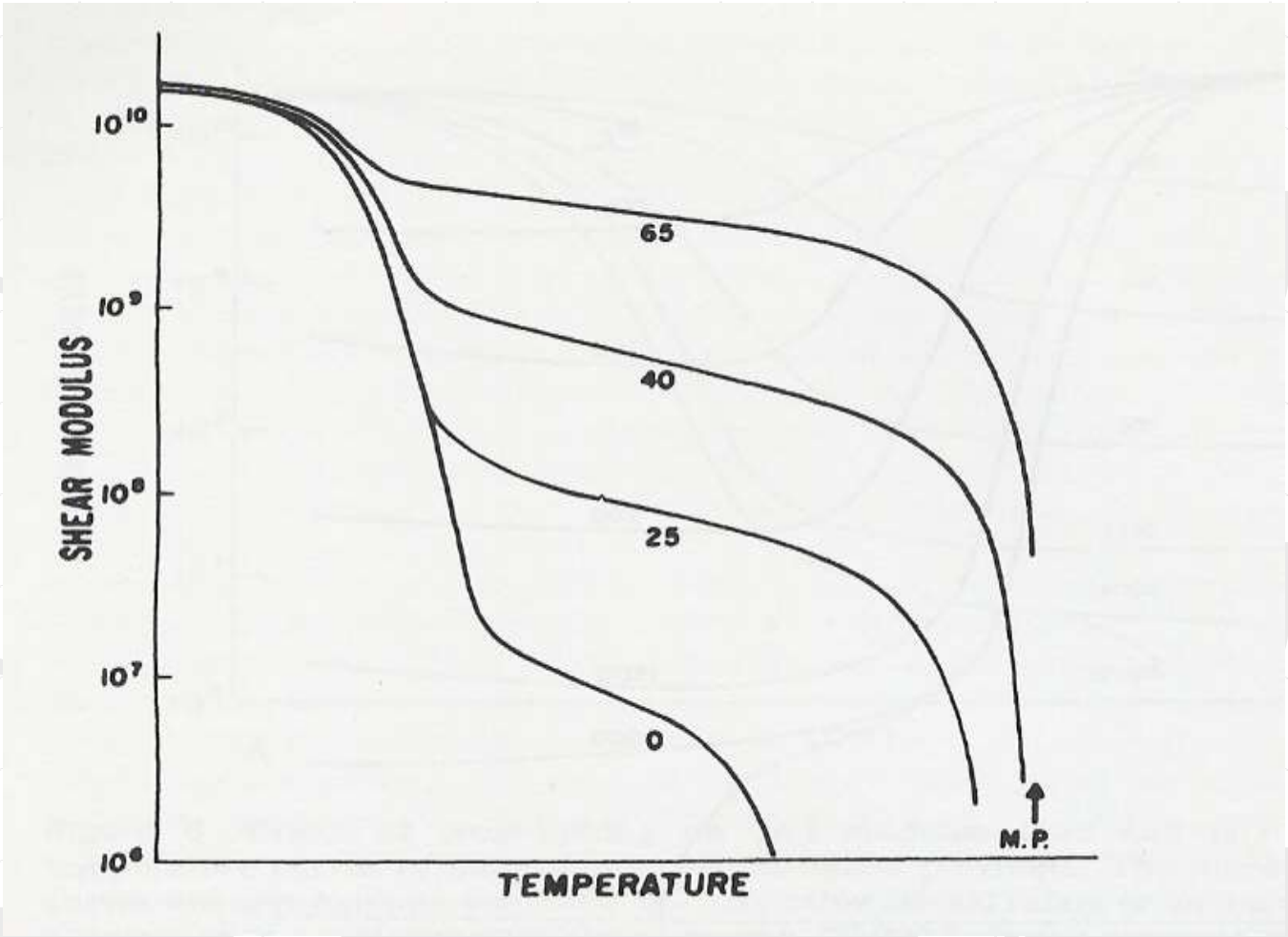

log G (t)
t_r
log t
A
10^{10}
10^9
10^8
10^7
10^6
SHEAR MODULUS
T_g
LOW
MEDIUM
HIGH
TEMPERATURE
B

RETICULAÇÃO

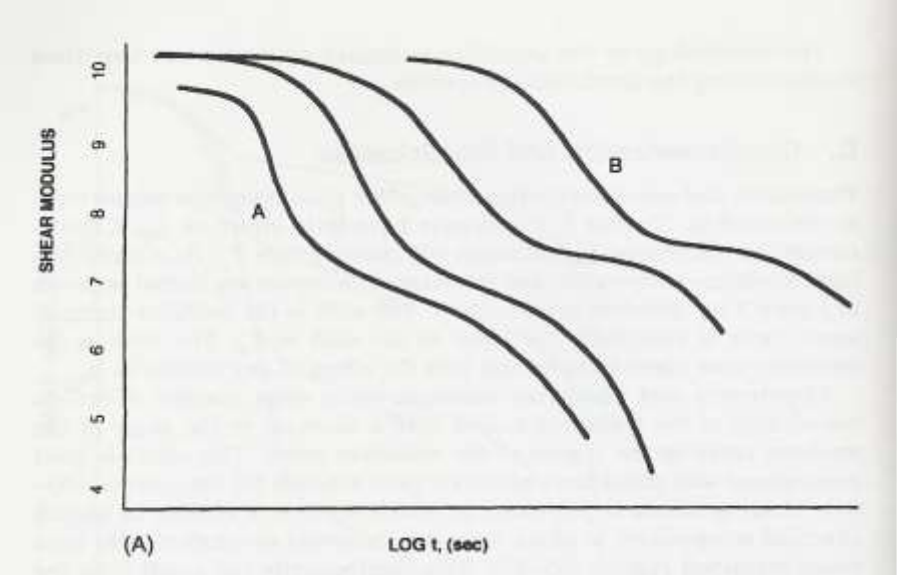


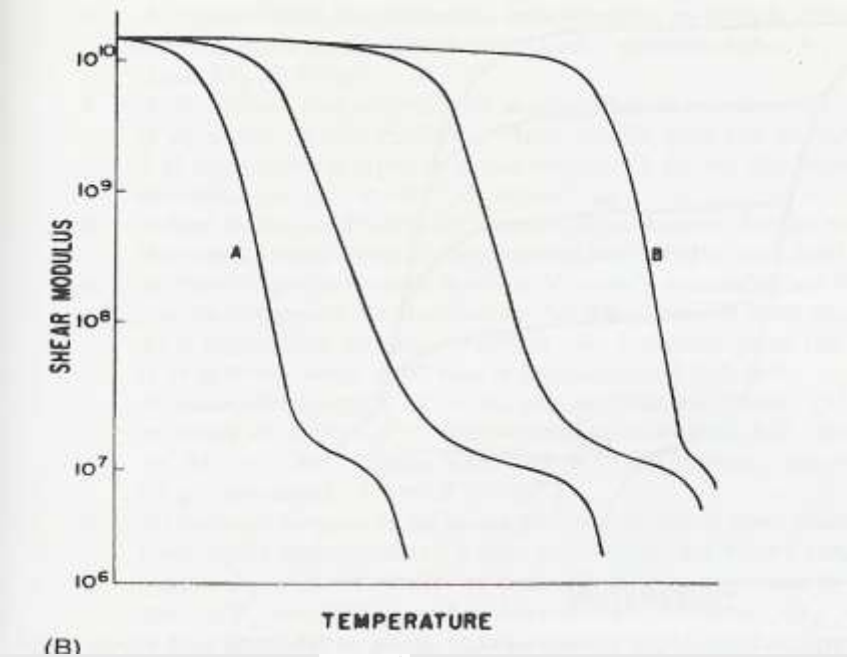


CRISTALINIDADE

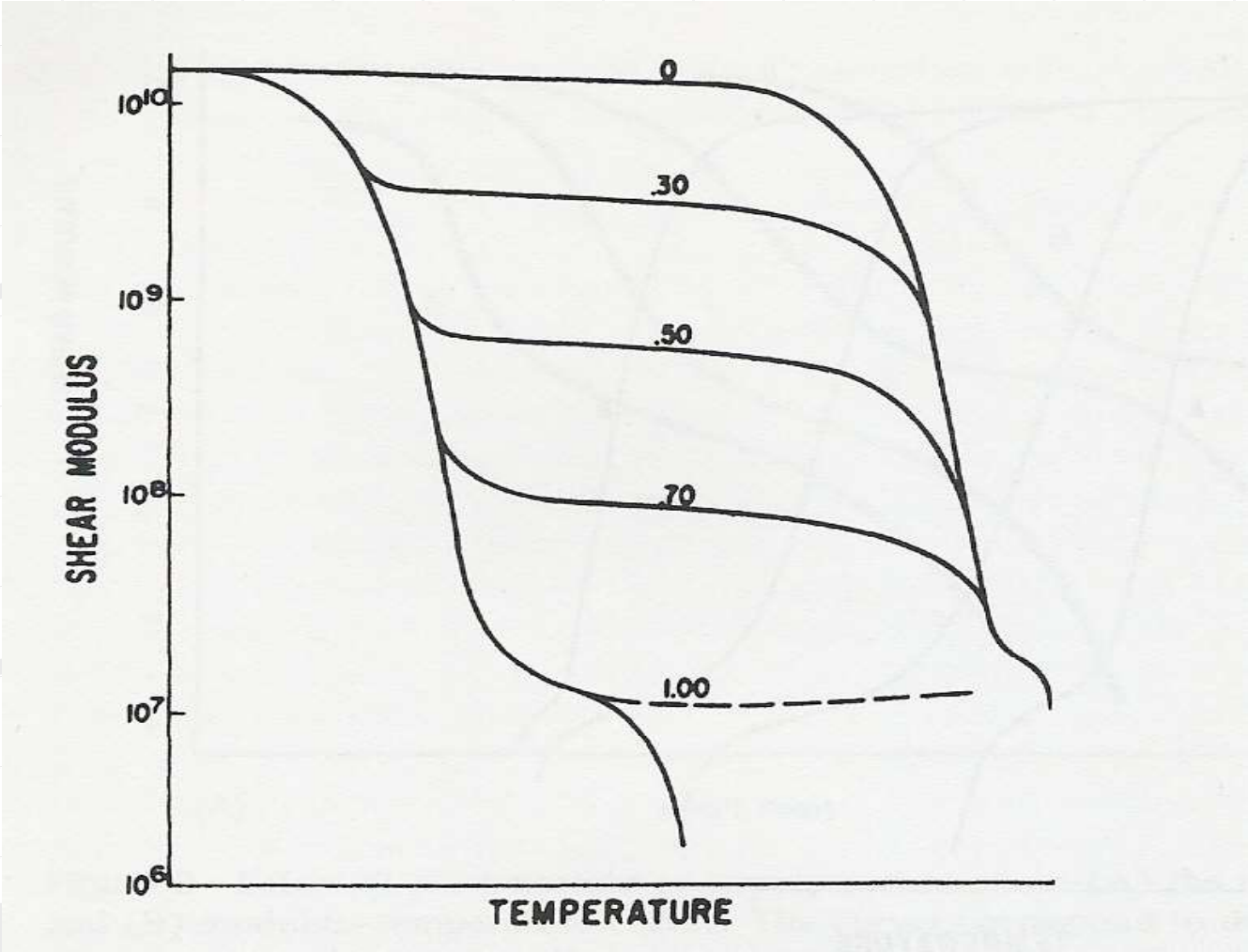


PLASTIFICAÇÃO E COPOLIMERIZAÇÃO





SISTEMA BIFÁSICO



DESEMPENHO DE LONGO PRAZO
TEMPO DE SERVIÇO

Os fatores que afetam o desempenho de um componente plástico podem ser separados em cinco variáveis que se estedem pelo ciclo de vida (lifecycle) da peça:

- Material
- Design
- Processamento
- Instalação
- Serviço

Failure within plastic components can take many forms, including:

- Deformation / Distortion
- Esthetic Alteration
- Degradation
- Wear
- Fracture

Failure occurs when a portion of the distribution of stress on the parts exceeds a portion of the distribution of strength of the parts.

- Ductile Fracture – Bulk Molecular Response through Yielding
- Brittle Fracture – Micro Molecular Response through Desentanglement

Short-Term Overload

Overload occurs primarily as a ductile fracture, when short-term applied stresses exceed the load-bearing capacity of the material.

ASTM D638

- ✓ Impact (high strain rates)
- ✓ Crack occurs when the minimum initiation propagation is exceeded.
- ✓ The amounts of energy is lower than required to failure given a slower strain rate.

Creep Rupture

Creep rupture occurs due to the formation of cracks as a function of time through extended exposure to levels of constant stress, tensile, compressive, shear, or flexural, that are below the yield strength of the material. Long-term constant stress leads to a decay in the apparent modulus through localized molecular reorganization of polymer chains through disentanglement. Under low to moderate stress over an extended time, plastics present apparent lower ductility thus, creep can result in brittle fracture in normally ductile plastic materials.

Fatigue

Fatigue is the progressive and localized structural damage to a polymeric material that occurs when a material is subjected to cyclic loading. The nominal maximum stress values are less than the yield strength and tensile strength of the material. Fatigue occurs when a material is subjected to repeated loading and unloading. If sufficient loading occurs, microscopic cracks will begin to form at the surface via disentanglement. Eventually, a crack will reach critical size, and the structure will suddenly fracture. Like creep, fatigue produces an apparent decay in strength over time / cycles.

Environmental Stress Cracking

Environmental stress cracking (ESC) is the premature embrittlement and subsequent cracking of a plastic due to the simultaneous and synergistic action of stress and contact with a chemical agent. No chemical reaction takes place between the polymer and the chemical agent, and there is no molecular degradation. The plastic would undergo stress cracking in air given sufficient time, and the presence of the chemical accelerates the stress cracking. The chemical agent permeates into the molecular structure and interferes with the intermolecular forces bonding the polymer chains. This reduces the energy required for disentanglement to occur, producing a shift in the preferred mechanism from yielding.

Molecular Degradation

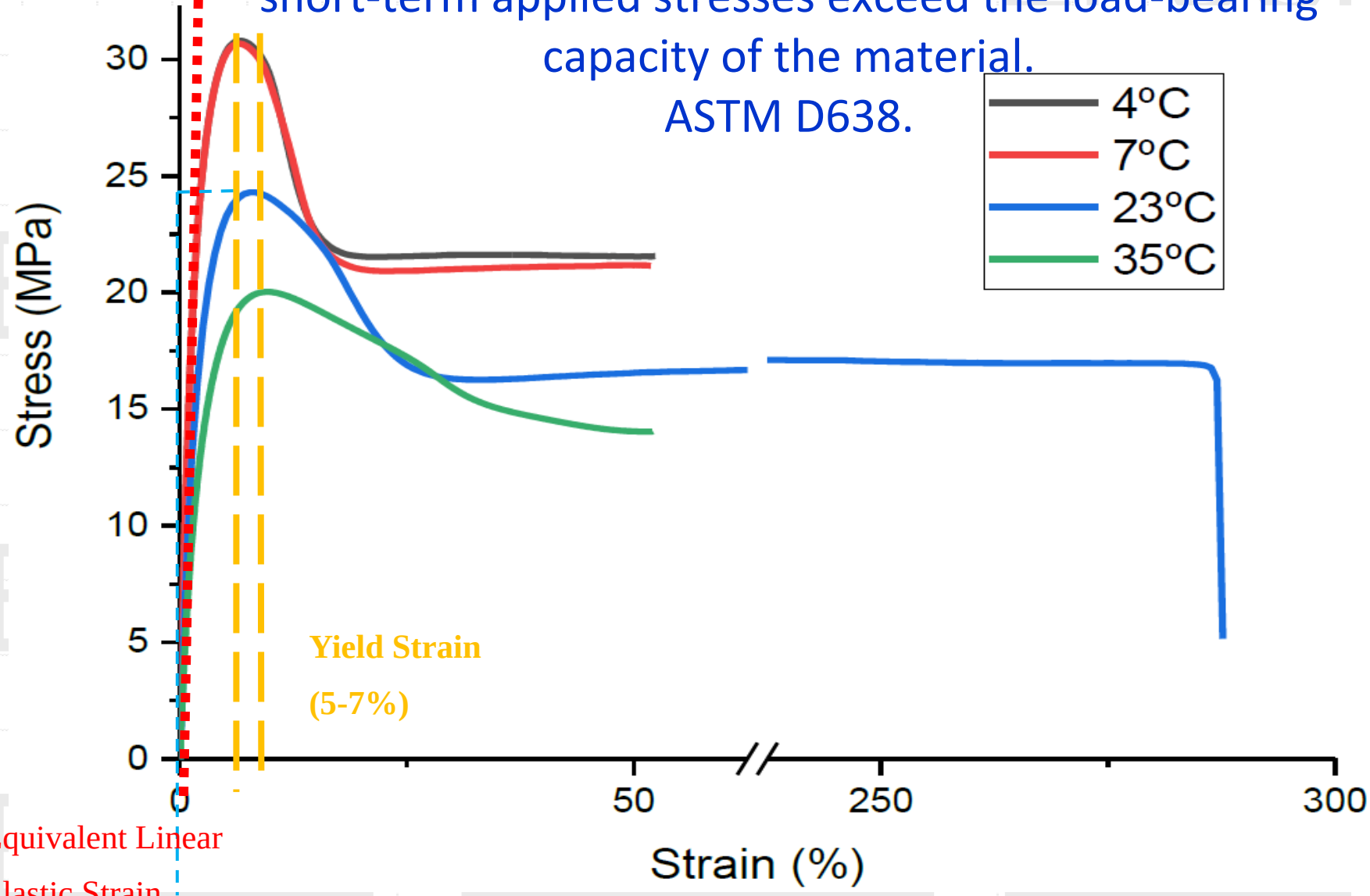
Molecular degradation within plastics represents a chemical reaction that reduces the molecular weight of the polymer, resulting in decreased material strength and ductility. The energy required for polymeric disentanglement is reduced with the associated shortening of the polymer chains. This degradation can occur through several mechanisms including:

- Oxidation
- Ultraviolet Radiation (UV)
- Hydrolysis
- Chain Scission
- Side Chain Alteration

Short-Term Overload

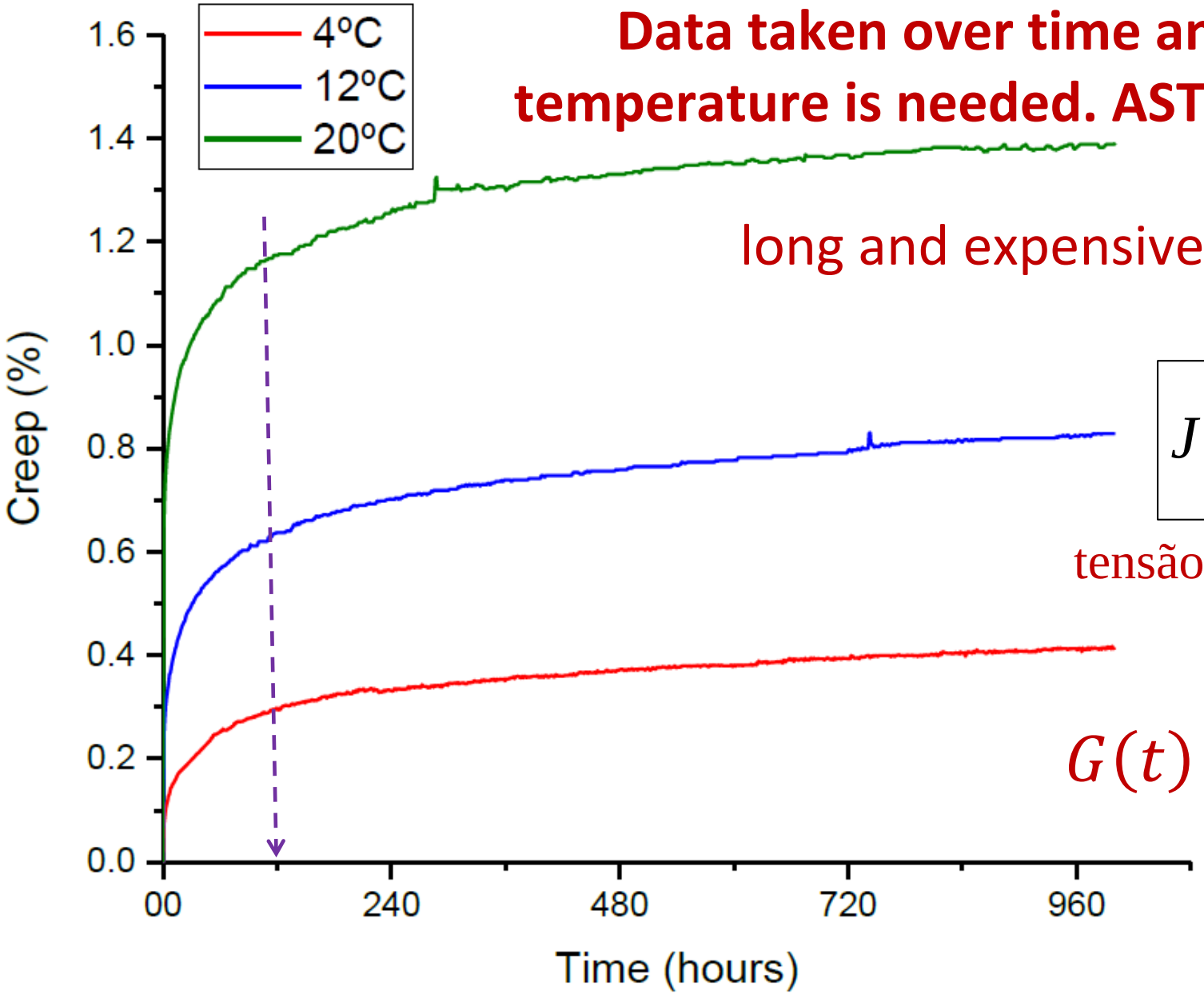
Overload occurs primarily as a ductile fracture, when short-term applied stresses exceed the load-bearing capacity of the material.

ASTM D638.



PREDICTING FAILURE THROUGH CREEP

Data taken over time and/or temperature is needed. ASTM D2990



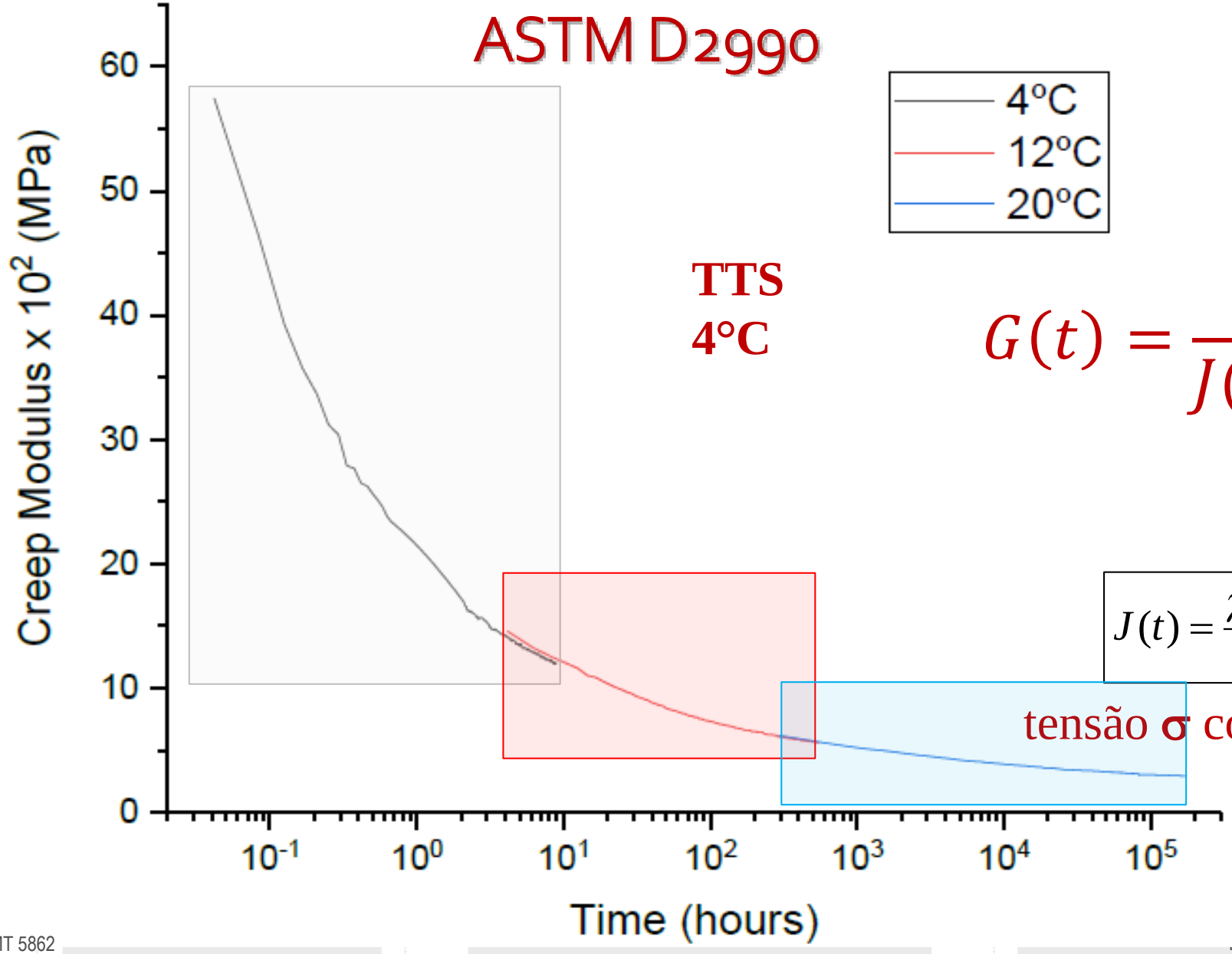
long and expensive

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma}$$

tensão **σ** constante

$$G(t) = \frac{1}{J(t)}$$

PREDICTING FAILURE THROUGH CREEP
ASTM D2990



TTS
4°C

$$G(t) = \frac{1}{J(t)}$$

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma}$$

tensão σ constante

PREDICTING FAILURE THROUGH CREEP
ASTM D2990

