

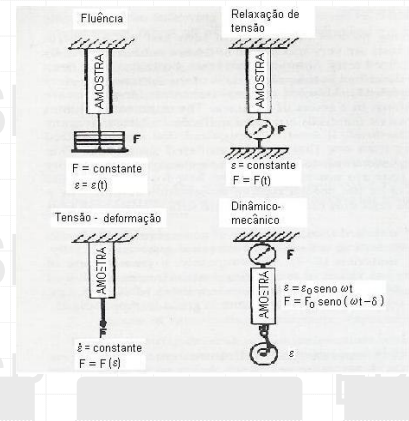
FUNDAMENTOS EM ESTRUTURA E PROPRIEDADES DE POLÍMEROS

PROPRIEDADES MECÂNICAS

PMT5862

Profª Drª Wang Shu Hui

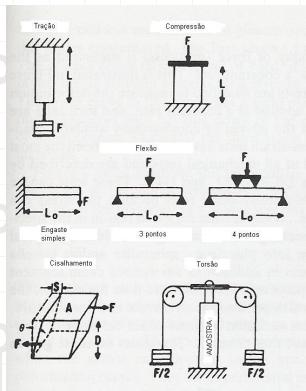
ENSAIOS MECÂNICOS



PMT 5862

Profª Drª Wang Shu Hui

GEOMETRIAS DOS ENSAIOS MECÂNICOS



PMT 5862

Profª Drª Wang Shu Hui

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:

$$\sigma = E\epsilon$$

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

- Para experimento de tensão (tração e compressão):

$$\text{tensão } \sigma = \frac{\text{força } F}{\text{seção reta } A}$$

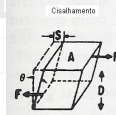
PMT 5862

Profª Drª Wang Shu Hui

PROPRIEDADES MECÂNICAS

- Para experimento de cisalhamento:

$$\text{tensão de cisalha } \sigma_s = \frac{\text{força de cisalhamento } F}{\text{superfície de cisalhamento } A}$$



- 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:

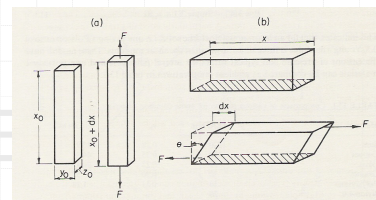
$$\sigma_s = \eta \frac{d\epsilon_s}{dt_s}$$

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

PMT 5862

Profª Drª Wang Shu Hui

DEFORMAÇÃO



- Tração e
- Cisalhamento

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

$\epsilon = \frac{dx}{x_0}$ para a deformação de engenharia,

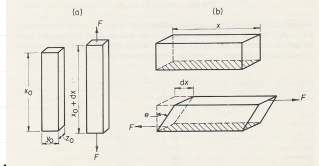
$\epsilon = \ln \frac{x}{x_0}$ para a deformação real,

$\epsilon = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{x}{x_0} \right) - \left(\frac{x_0}{x} \right)^2 \right]$ para a deformação obtida pela teoria cinética da elasticidade.

PMT 5862

Profª Drª Wang Shu Hui

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:

$$\text{deformação de cisalhamento } \gamma = \frac{\text{deslocamento de cisalhamento}}{\text{distância entre as superfícies}} = \tan \theta$$

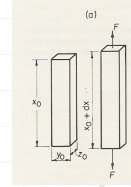
PMT 5862

Profª Drª Wang Shu Hui

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 :

$$\nu_p = -\frac{\frac{dy}{y_0}}{\frac{dx}{x_0}}$$



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

PMT 5862

Profª Drª Wang Shu Hui

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 ($\nu_p = 0,5$) e a relação torna-se:

$$E = 3G$$

PMT 5862

Profª Drª Wang Shu Hui

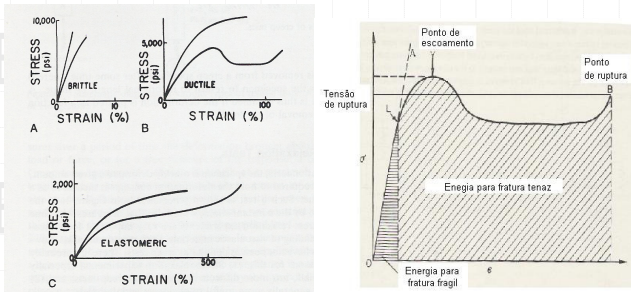
COMPARAÇÃO DOS MÓDULOS DE MATERIAIS

MATERIAL	E (GPa)	G (GPa)	ν_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

PMT 5862

Profª Drª Wang Shu Hui

ENSAIO DE TRAÇÃO



PMT 5862

Profª Drª Wang Shu Hui

PROPRIEDADES MECÂNICAS

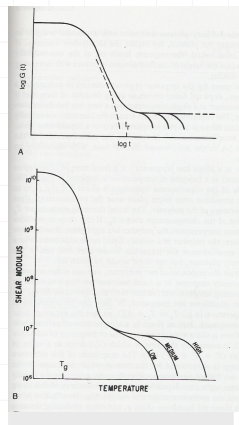
♦ MÓDULO DE ELASTICIDADE E ESTRUTURA DO POLÍMERO

- ♦ MASSA MOLAR
- ♦ RETICULAÇÃO
- ♦ CRISTALINIDADE
- ♦ COPOLIMERIZAÇÃO
- ♦ PLASTIFICAÇÃO
- ♦ COPOLÍMEROS SEGMENTADOS E BLENDS

PMT 5862

Profª Drª Wang Shu Hui

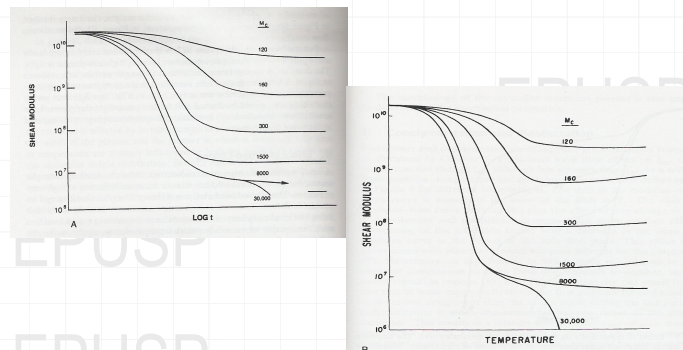
MASSA MOLAR



PMT 5862

Profª Drª Wang Shu Hui

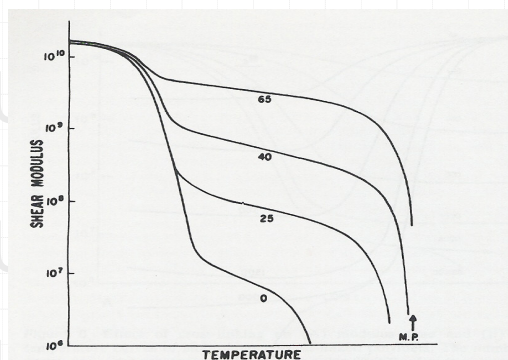
RETICULAÇÃO



PMT 5862

Profª Drª Wang Shu Hui

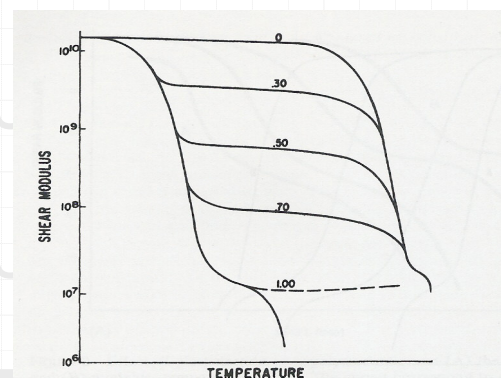
CRISTALINIDADE



PMT 5862

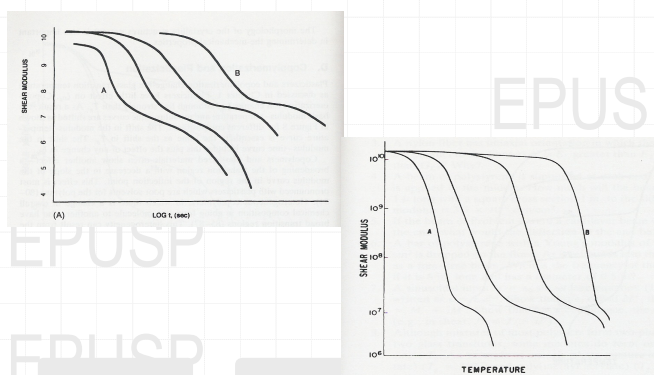
Profª Drª Wang Shu Hui

SISTEMA BIFÁSICO



Profª Drª Wang Shu Hui

PLASTIFICAÇÃO E COPOLIMERIZAÇÃO



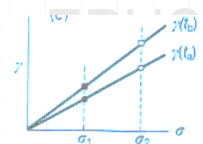
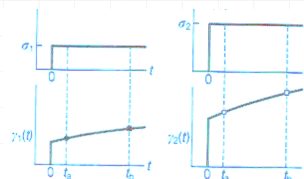
Profª Drª Wang Shu Hui

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 compliância $J(t)$ no tempo t .

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



Profª Drª Wang Shu Hui

FLUÊNCIA

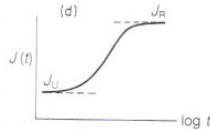
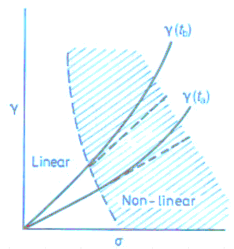
♦ FLUÊNCIA VISCOELÁSTICA LINEAR

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).



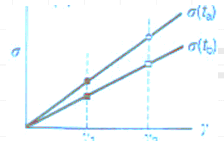
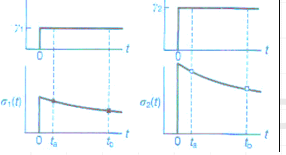
J_U – compliança não-relaxada
 J_R – compliança relaxada

Profª Drª Wang Shu Hui

RELAÇÃO DE TENSÃO

♦ RELAXAÇÃO DE TENSÃO

Em duas condições distintas de DEFORMAÇÃO γ_1 e γ_2 são observadas duas curvas de relaxação de tensão $\sigma_1(t)$ e $\sigma_2(t)$ 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 .



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

Profª Drª Wang Shu Hui

RELAÇÃO DE TENSÃO

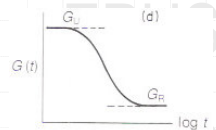
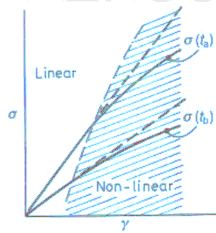
♦ RELAXAÇÃO DE TENSÃO VISCOELÁSTICA LINEAR

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

Profª Drª Wang Shu Hui

PROPRIEDADES DOS POLÍMEROS A PARTIR DE EXPERIMENTOS IDEALIZADOS

- Relaxação de tensão
- Fluência
- Testes dinâmicos

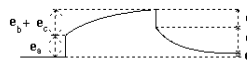
Profª Drª Wang Shu Hui

MODELOS MECÂNICOS QUE DESCREVEM VISCOELASTIDADE

COMPORTAMENTO SOB TENSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO

APLICAÇÃO DE TENSÃO

DEFORMAÇÃO



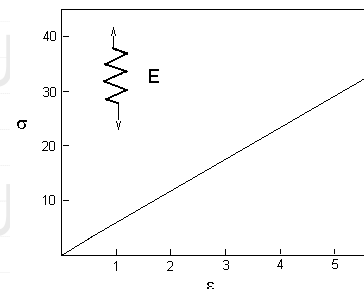
e_a – deformação elástica imediata – recuperável
 e_b – deformação elástica retardada – recuperável
 e_c – deformação por escoamento plástico – deformação permanente

ELÁSTICO

VISCOELÁSTICO LINEAR

Profª Drª Wang Shu Hui

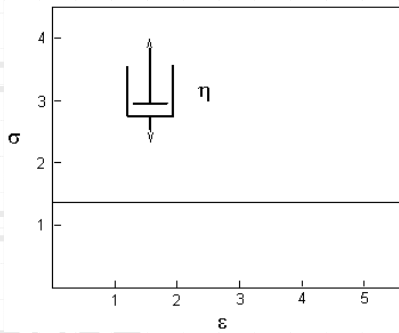
SÓLIDO PERFEITAMENTE ELÁSTICO – LEI DE HOOKE



$$\sigma = E \epsilon$$

Profª Drª Wang Shu Hui

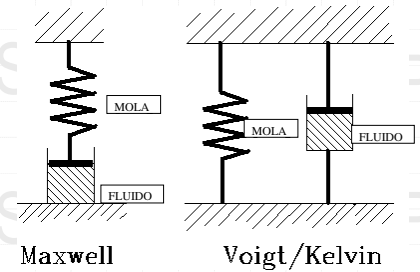
FLUIDO NEWTONIANO



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

Profª Drª Wang Shu Hui

MODELOS MECÂNICOS



Maxwell

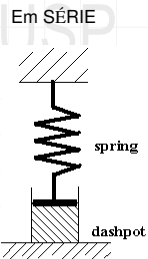
Voigt/Kelvin

Profª Drª Wang Shu Hui

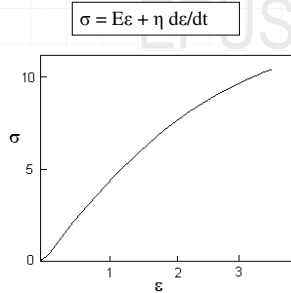
MODELO MAXWELL (MAIS SIMPLES) DE TENSÃO EM POLÍMERO

UM COMPONENTE HOOKEANO
UM COMPONENTE NEWTONIANO

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



Maxwell



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

Profª Drª Wang Shu Hui

RELAXAÇÃO DE TENSÃO

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

$$\epsilon = \epsilon_{\text{elast}} + \epsilon_{\text{visc}}$$

$$\begin{aligned} \text{para cisalhamento: } d\epsilon/dt &= (1/G)(d\sigma/dt) + \sigma/\eta & G &= \sigma_s/\epsilon_s \\ \text{para tração: } d\epsilon/dt &= (1/E)(d\sigma/dt) + \sigma/\eta & E &= \sigma/\epsilon \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \text{para cisalhamento: } d\sigma/dt + G\sigma/\eta &= 0 & \text{ou} & \quad d\sigma/dt = -G\sigma/\eta \\ \text{para tração: } d\sigma/dt + E\sigma/\eta &= 0 & \text{ou} & \quad d\sigma/dt = -E\sigma/\eta \end{aligned}$$

Integrando e tomando a tensão inicial igual a tensão imposta σ_0

$$\begin{aligned} \text{para cisalhamento: } \sigma &= \sigma_0 \exp(-t G/\eta) \\ \text{para tração: } \sigma &= \sigma_0 \exp(-t E/\eta) \end{aligned}$$

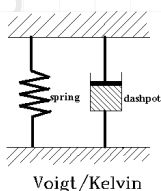
Quando $t = \eta/G$ (ou $t = \eta/E$), o valor original da tensão fica reduzida em $1/e$ ($e = 2,718$), $\sigma = 0,3679\sigma_0$, e o tempo t é conhecido como **tempo de relaxação**.

Profª Drª Wang Shu Hui

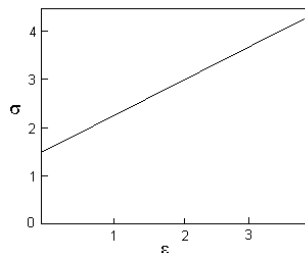
MODELO VOIGT-KELVIN DE TENSÃO EM POLÍMERO

UM COMPONENTE HOOKEANO
UM COMPONENTE NEWTONIANO

Em paralelo



Voigt/Kelvin



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

Profª Drª Wang Shu Hui

ENSAIO DE FLUÊNCIA - CREEPING

Os componentes MOLA e FLUIDO partilham a tensão e são sujeitos a mesma deformação:

$$\sigma = \sigma_{\text{elástico}} + \sigma_{\text{viscoso}}$$

$$\sigma = G\epsilon + \eta \frac{d\epsilon}{dt}$$

$$\frac{\sigma}{\eta} = \frac{G\epsilon}{\eta} + \frac{d\epsilon}{dt}$$

$$\frac{G}{\eta} dt = \frac{d\epsilon}{\frac{\sigma}{G} - \epsilon}$$

$$\text{Integrando: } \frac{G}{\eta} t = \ln \frac{G}{\frac{\sigma}{G} - \epsilon}$$

$$\frac{\sigma}{G} = \left(\frac{\sigma}{G} - \epsilon \right) e^{\frac{G}{\eta} t} \Rightarrow \epsilon = \frac{\sigma}{G} \left[1 - e^{-\frac{G}{\eta} t} \right]$$

e para $t = 0$, $\sigma = \sigma_0$ e $\epsilon = 0$ e substituindo o módulo pela **compliance** $J(t) = \epsilon_s/\sigma_s$ e $D(t) = \epsilon/\sigma$

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

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

Profª Drª Wang Shu Hui

ENSAIO DE FLUÊNCIA - *CREEPING*

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

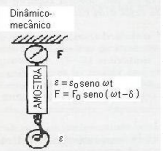
Onde $\tau_R = \eta/G$ é o **tempo de retardação** e está relacionado com o intervalo de tempo entre a aplicação da tensão e a deformação.

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

Profª Drª Wang Shu Hui

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 frequência 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.

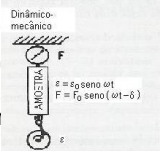


Profª Drª Wang Shu Hui

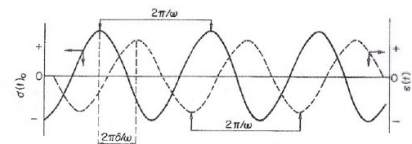
ANÁLISE TÉRMICA DINÂMICO-MECÂNICA DMTA OU DMA

- Os materiais poliméricos submetidos a deformações oscilatórias mecânicas forçadas manifestam um comportamento viscoelástico. O comportamento viscoelástico varia com a frequência 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 $\tan \delta$, que é a tangente do ângulo da diferença de fase, isto é, E''/E' (ou G''/G').



Profª Drª Wang Shu Hui



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:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (1)$$

e a **tensão**:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad \text{ou expandindo:} \quad (2)$$

$$\sigma = (\sigma_0 \cos \delta) \sin \omega t + (\sigma_0 \sin \delta) \cos \omega t \quad (3)$$

A deformação aparece defasada de ângulo δ , após a tensão. Na decomposição vetorial a tensão apresenta dois componentes: um em fase com a deformação ($\sigma_0 \cos \delta$); e o outro defasado 90° ($\sigma_0 \sin \delta$).

Profª Drª Wang Shu Hui

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

$$\sigma = \varepsilon_0 [E' \sin \omega t + E'' \cos \omega t] \quad (4)$$

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

$$E' = \frac{\sigma_0 \cos \delta}{\varepsilon_0} \quad (5) \quad E'' = \frac{\sigma_0 \sin \delta}{\varepsilon_0} \quad (6)$$

O componente da tensão $E'\varepsilon_0$ está em fase com a deformação; e o componente $E''\varepsilon_0$ está fora de fase em 90° .

Profª Drª Wang Shu Hui

Utilizando a representação complexa para vetores temos:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i\omega t} \quad (7)$$

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{i(\omega t + \delta)} \quad (8)$$

O módulo complexo é então:

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

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\delta}$$

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos \delta + i \sin \delta) \quad (10)$$

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

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

Profª Drª Wang Shu Hui

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

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:

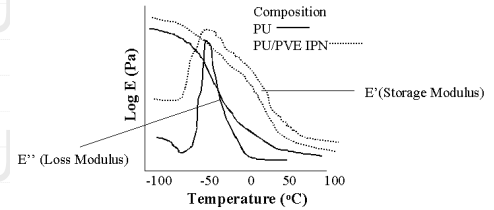
$$\tan \delta = E''/E' \quad (12)$$

Para sólidos puramente elásticos a $\tan \delta$ 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.

Profª Drª Wang Shu Hui

DMTA

Polyurethane/Polyvinylester System



Profª Drª Wang Shu Hui

DMTA

- ♦ A habilidade do material armazenar e dissipar energia mecânica é função da temperatura e do tempo.
- ♦ Durante uma relaxação mecânica, a frequência da movimentação molecular entra em ressonância com a frequência 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.

Profª Drª Wang Shu Hui