



## PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS POLÍMEROS

### FRAÇÃO ELÁSTICA DA DEFORMAÇÃO

Aparece devido a variação do ângulo e distância de ligação entre os átomos da cadeia polimérica, tanto da principal quanto de grupos laterais.

### FRAÇÃO PLÁSTICA DA DEFORMAÇÃO

Deve-se ao atrito e escoamento entre as moléculas poliméricas, fazendo com que ocorra um tempo de retardo para responder à solicitação aplicada, ou seja, existe uma defasagem entre a solicitação e a resposta.

### MODELOS DE VISCOSIDADE LINEAR

No comportamento viscoelástico de um material polimérico a fração elástica da deformação é representada por uma mola, e a fração plástica é representada por um amortecedor ou pistão com fluido.

Matematicamente, são assim representadas:

Componente elástico - Sólido Ideal (Mola) - Lei de Hooke

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

Componente plástico - Fluido Viscoso (Amortecedor) - Lei de Newton

$$\sigma = \eta \times (d\varepsilon : dt)$$

Onde:

$\sigma$  - Tensão                       $\varepsilon$  - deformação                       $E$  - módulo de elasticidade

$\eta$  - viscosidade                       $d\varepsilon : dt$  - taxa de deformação

### **$E$ - Módulo Elástico ou Módulo de Young:**

Está relacionado com a energia necessária para deformar os ângulos e a distância de ligação entre os átomos da cadeia polimérica. Quanto mais rígida a cadeia polimérica maior será o módulo  $E$ .

### **$\eta$ - Viscosidade:**

Está relacionada com o atrito entre as moléculas poliméricas gerado durante a deformação. Quanto maior o atrito molecular maior o valor da viscosidade.

**$d\varepsilon : dt$  - Taxa ou Velocidade de Deformação:**

Este parâmetro indica a influência do tempo na resposta de um polímero a uma determinada sollicitação.

## VISCOELASTICIDADE

A viscoelasticidade de um material polimérico é caracterizada pelos comportamentos: mecânico de um sólido ideal (lei de Hooke), e o de um fluido viscoso (lei de Newton). Eles ocorrem concomitantemente quando o material é exposto a uma tensão, que depois é removida.

### COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UMA MOLA (SÓLIDO IDEAL)

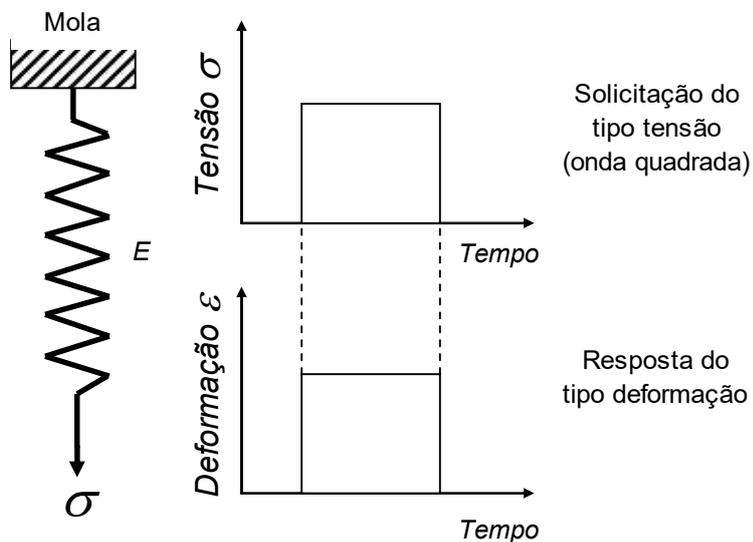


Figura 9. Deformação ( $\varepsilon$ ) de uma mola (elemento elástico ideal com módulo  $E$ ) como resposta a uma sollicitação do tipo tensão ( $\sigma$ ) na forma de onda quadrada.

Ao aplicar-se uma tensão no sistema ocorre uma deformação instantânea que se mantém enquanto a tensão existir. Cessada a tensão, a deformação retorna a origem (Figura 9).

## COMPORTAMENTO DE UM FLUÍDO VISCOSO - LEI DE NEWTON

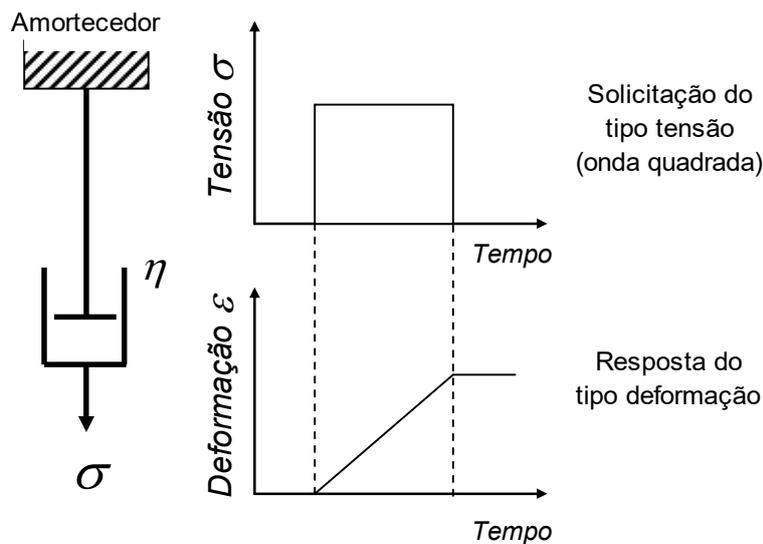


Figura 10. Deformação ( $\epsilon$ ) de um amortecedor (elemento viscoso ideal com fluido Newtoniano de viscosidade  $\eta$ ) como resposta a uma solicitação do tipo tensão ( $\sigma$ ) na forma de onda quadrada.

Ao aplicar-se uma tensão no sistema não ocorre uma deformação instantânea, dá-se de forma retardada, enquanto a tensão existir. Cessada a tensão, a deformação permanece, não retorna a origem (Figura 10).

## COMPORTAMENTO EM SÉRIE - MODELO DE MAXWELL

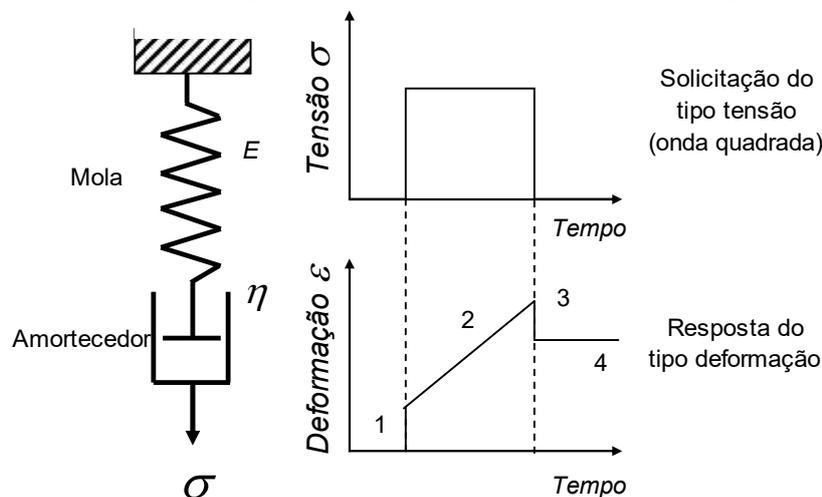


Figura 11. Modelo de Maxwell com os elementos em série e sua resposta ( $\epsilon \times t$ ) a uma solicitação do tipo tensão com onda quadrada ( $\sigma \times t$ ).

Ao aplicar-se uma tensão no sistema ocorre uma parcela de deformação instantânea elástica (1) e outra deformação retardada plástica (2) que acompanha a aplicação da tensão. Cessada a tensão haverá uma recuperação parcial elástica (3) e ficará mantida a deformação plástica (4) (Figura 11).

## COMPORTAMENTO EM PARALELO - MODELO DE VOIGT

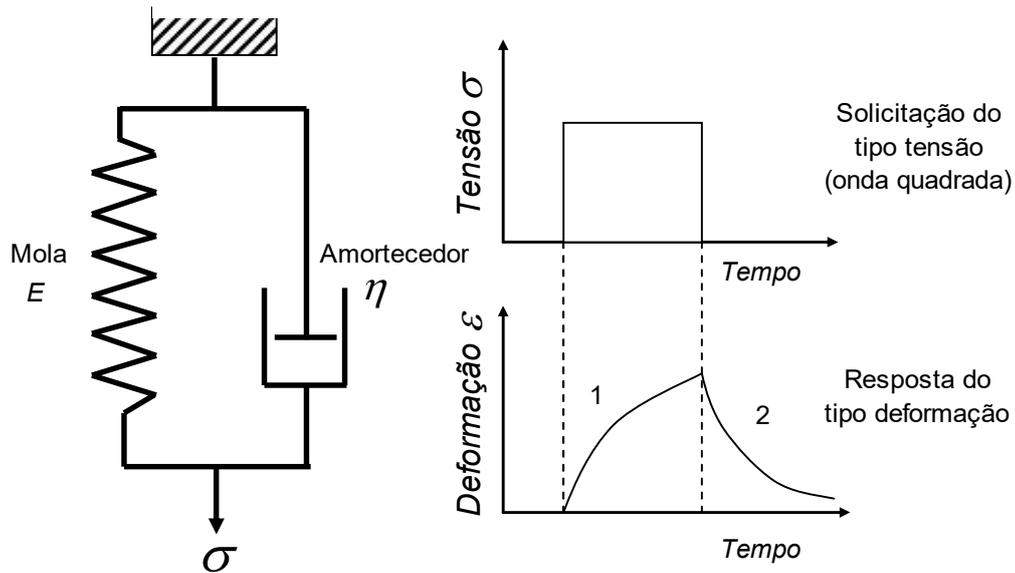


Figura 12. Modelo de Voigt com os elementos em paralelo e sua resposta ( $\epsilon \times t$ ) a uma solicitação do tipo tensão com onda quadrada ( $\sigma \times t$ ).

Ao aplicar-se uma tensão no sistema ocorre uma deformação elástica retardada por uma componente viscosa (1). Cessada a tensão haverá uma recuperação elástica retardada pela mesma componente viscosa anterior (2) (Figura 12).

## COMPORTAMENTO EM SÉRIE E PARALELO - MODELO DE MAXWELL/VOIGT

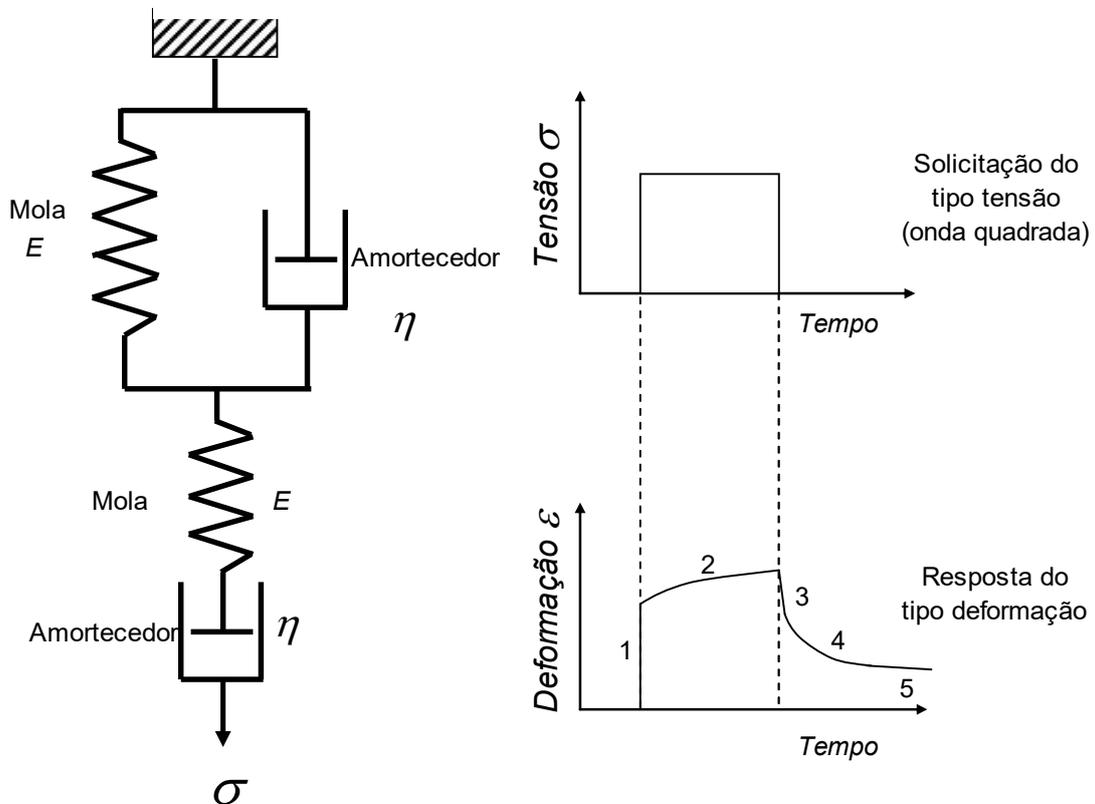


Figura 13. Modelo de Maxwell/Voigt e curva resposta ( $\varepsilon \times t$ ) a uma solicitação do tipo tensão com onda quadrada ( $\sigma \times t$ ).

Ao aplicar-se uma tensão no sistema ocorre uma deformação elástica instantânea (1) seguida de uma deformação elástica retardada com um componente viscoso (2). Cessada a tensão haverá uma recuperação elástica instantânea (3) seguida de uma recuperação elástica retardada com componente viscoso (4) e permanecerá uma deformação permanente plástica (5) (Figura 13).

No modelo Maxwell/Voigt cada porção da curva deformação  $\times$  tempo é função de um elemento individual ou da ação conjunta de dois elementos. Nesse caso, a previsão está mais próxima do comportamento real, considerando-se a existência de resposta elástica instantânea e de uma deformação plástica residual.

## **DEPENDÊNCIA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS COM O TEMPO**

Uma das características mais marcantes dos polímeros é a extrema dependência de suas propriedades mecânicas com o tempo, a qual pode ser observada como segue:

- **Fluência:** é o fenômeno no qual uma amostra polimérica é submetida a uma tensão constante e como resposta a mesma se deformará continuamente com o tempo.
- **Relaxação de tensão:** é o fenômeno no qual uma amostra polimérica é deformada rapidamente e mantida sob deformação, sendo que a tensão aplicada para manter esta deformação diminui com o tempo.
- **Velocidade:** se uma amostra polimérica é estirada sob tração a uma velocidade baixa seu módulo será alto; entretanto se a velocidade de deformação aumentar o módulo será baixo.

## **COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DEPENDENTE DO TEMPO**

Material viscoelástico: propriedades concomitantes de sólido e líquido viscoso.

Resposta do material:

- Com pequenos tempos (altas frequências) a resposta tem predomínio da componente elástica.
- Com longos tempos (baixas frequências) a resposta tem predomínio da componente plástica.

**"A história da carga é crucial, tudo flui se esperarmos tempo suficiente".**

## PRINCIPIOS FUNDAMENTAIS DE REOLOGIA DE POLÍMEROS

Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, analisando as respostas (deformações ou tensões) de um material quando provocada a aplicação de uma tensão ou uma deformação.

Usamos a reologia para estudar as relações fundamentais entre as forças e as deformações nos materiais, chamadas de relações constitutivas.

A análise reológica analisa as respostas de um material provocadas pela aplicação de uma tensão ou de uma deformação. "Toda a matéria flui sob influência de uma força ou de uma tensão, que é a energia externa aplicada sobre essa matéria".

Temos como exemplos: a água que flui imediatamente, pois seu tempo de relaxação ( $t^*$ ) muito pequeno,  $t^* = 10^{-12}$ s, para que a força aplicada decaia totalmente. Nos polímeros, depende da estrutura molecular e da temperatura de processamento, para o material plastificado  $t^* = 10^{-2}$  a 10s.

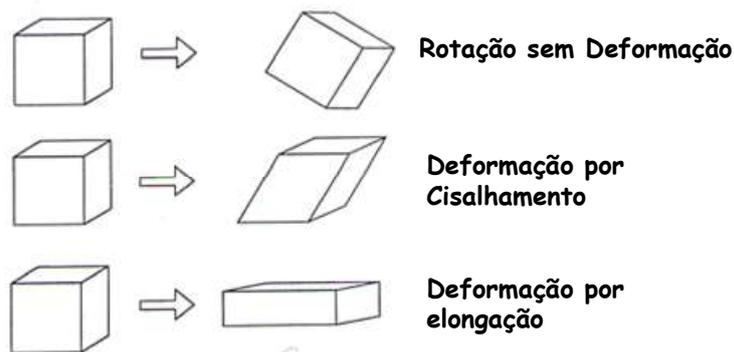
A maioria dos polímeros pode ser considerado como um tipo especial de material, que apresenta ao mesmo tempo características tanto de materiais sólidos como de materiais líquidos. Esta propriedade é conhecida como viscoelasticidade, sendo inerente aos materiais de elevada massa molecular.

Sólido Ideal ----- MATERIAIS POLIMÉRICOS ----- Fluido Ideal  
Puramente Elástico ----- VISCOELÁSTICO ----- Puramente Viscoso

São os vários tipos de forças que atuam sobre uma determinada área. Destaca-se, considerando grandezas vetoriais, que para cada componente vetorial uma direção estará associada:

- Tensões normais: atuam na direção normal (perpendicular) às faces da unidade de elemento.
- Tensões de cisalhamento: atuam na direção paralela a uma dada face da unidade de elemento.

## DEFORMAÇÃO



Em reologia, a relação entre o tempo natural ou característico de relaxação do material  $\lambda_T$  e o intervalo de tempo no qual foi aplicada a deformação ou tensão (tempo de duração do experimento,  $t$ ), é conhecida como número de Deborah ( $D_e$ ) -  $D_e = \lambda_T : t$ .

$\lambda_T$  está associado ao tempo necessário para o material realizar movimentos moleculares mais lentos.

Assim sendo,  $D_e$  representa uma relação entre as forças elásticas e as viscosas que atuam no material. Ou seja, se  $t < \lambda_T$  o material não terá tempo suficiente para atingir o regime permanente e os processos de relaxação irão dominar durante o experimento.

Os sólidos elásticos possuem  $\lambda_T \Rightarrow \alpha$  e os líquidos viscosos possuem  $\lambda_T \Rightarrow 0$ .

Logo, para sólidos elásticos  $D_e \Rightarrow \alpha$  e para fluídos viscosos  $D_e \Rightarrow 0$ . Para materiais viscoelásticos  $0 < D_e < \alpha$ .

Os polímeros "fundidos" apresentam valores de  $\lambda_T$  entre 1 s e 1000 s, dependendo da massa molecular, e para soluções poliméricas diluídas o valor de  $\lambda_T$  é de aproximadamente 0,001 s, sendo que a água apresenta um valor de aproximadamente  $10^{-12}$  s.

Podemos concluir que: um dado material pode ter características de um sólido porque seu  $\lambda_T \Rightarrow \alpha$ , ou o processo de deformação é muito rápido, e portanto, ele não terá tempo para relaxar. Por exemplo, se um certo tipo de material de silicone (*silly putty*) for colocado em um recipiente, por um determinado tempo, ele escoará adotando a forma do recipiente, porque  $t \gg \lambda_T$ . Porém, se o mesmo material for jogado rapidamente contra a parede ele comporta-se como um sólido elástico, porque  $t \ll \lambda_T$ . Portanto, o número de Deborah expressa o conceito clássico que tudo flui, desde que se espere um tempo suficiente; permitindo classificar os materiais do ponto de vista reológico.