



Departamento de Engenharia de Materiais (SMM)
Escola de Engenharia de São Carlos (EESC)
Universidade de São Paulo (USP)

SMM0315 – Processamento de Materiais IX:
Polímeros

Docente: Marcelo A. Chinelatto

Fevereiro – Julho de 2025

1

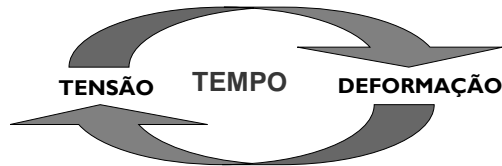
Revisão sobre Reologia

2

Reologia – Introdução

A palavra reologia é derivada do grego:
Rheo: Fluir e *Logia*: Estudo

Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria por meio da análise, entre outras, das respostas (na forma de deformações ou tensões) de um material à aplicação de uma tensão ou de uma deformação. A matéria pode estar no estado líquido, sólido ou gasoso.



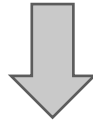
3

Reologia – Introdução

Entretanto,

a reologia não deve ser limitada a descrever a deformação, o fluxo e, relacioná-los com conceitos de tensão, deformação e tempo.

Esta forma de interpretar a reologia afasta a oportunidade de se correlacionar as evidências advindas de outros tipos de medidas físicas, além da mecânica, que podem interpretar as funções e as constantes reológicas dos materiais em termos de **estrutura interna**.

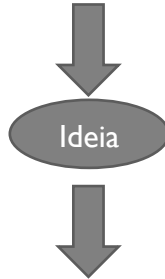


a combinação das informações a cerca da estrutura (e que são provenientes de outras fontes experimentais) com as propriedades mecânicas devem permitir o **entendimento do significado físico do processo global**.

4

Histórico

- 1924-1928: Grupo do Prof. Bingham publica os primeiros trabalhos sobre elasticidade e plasticidade de materiais.
- 1929: Prof. Bingham propões o nome de Reologia para tal ciência.



todas as substâncias escoam ou deformam se certas forças específicas forem aplicadas às mesmas para produzirem este fenômeno.

5

Histórico

◦ As características de escoamento e deformação variam consideravelmente entre os diferentes materiais.

- em alguns, forças enormes produzem apenas modificações infinitesimais, mesmo que aplicadas durante longos períodos de tempo.
- em contraste, outros materiais sofrem grandes e evidentes transformações, quando submetidos à forças e energias diminutas.

Então, em todos os seus estados, sólido, líquido ou gasoso, a matéria escoam.

6

Reologia – Introdução

Desto forma, pode-se então reforçar o conceito de que **reologia** é o estudo organizado para relacionar a constituição da matéria com as observações físicas.

Na prática:

As propriedades de escoamento de materiais podem ser utilizadas com certas vantagens:

- **Tintas:** colóides (partículas entre nm e micrometros) ficam suspensos em um veículo, permitindo que a mesma seja espalhada em uma superfície por meio de pincel ou rolo.
- **Viscosidade de óleos:** óleo para motor em ambiente à baixas temperaturas. A alta viscosidade do óleo dificulta a partida inicial do motor.

7

Reologia – Introdução

A **reologia** tem por finalidade prever a força necessária para causar uma dada deformação ou escoamento em um corpo, ou reciprocamente, prever a deformação ou escoamento resultante da aplicação de um dado sistema de forças em um corpo.

Se um corpo é um fluido, a aplicação de qualquer sistema de forças anisotrópicos (em diferentes direções) e heterogêneo (em diferentes posições), mas pequeno, resultará em escoamento.

Por outro lado, se um corpo é sólido, a aplicação de um sistema de forças (anisotrópico ou isotrópico) e não homogêneo resultará em deformação e não em escoamento.

Com a relaxação do sistema de forças, o corpo retornará a seu estado original, não deformado.

8

Reologia – Introdução

Se o corpo em consideração é um plástico, ele escoará como um fluido, se a força aplicada exceder a um valor crítico.

Caso contrário, **o corpo deformará como um sólido elástico**.

Por que estudar reologia?

Alguns motivos:

- Estudar o processamento dos materiais
- Simular o processamento dos materiais
- Controlar o processamento dos materiais
- Construir máquinas para o processamento dos materiais
- Projetos e cálculos de equipamentos (bombas e tubulações, agitadores, trocadores de calor, homogeneizadores, extrusoras, ...)
- Construir equipamentos para caracterizar os materiais
- Controlar a qualidade do material processado
- Determinar as características do produto final processado

9

Reologia – Introdução

Fenômenos reológicos na Natureza:

- Exemplos:
- Terremotos
 - Enchentes
 - Erupções vulcânicas

Fenômenos reológicos no Cotidiano:

- Exemplos:
- Viscosidade do óleo lubrificantes de automóveis
 - Viscosidade do sangue
 - Viscosidade o preparo de formulação de culinárias (sucos, bolos, massas, óleos...)
 - Viscosidade de cremes (dental, corporal, ...) e xampus
 - Viscosidade de pomadas

10

Reologia – Introdução

Fenômenos reológicos na Indústria:

Exemplos:

- Química (sólidos e fluidos em geral)
- Farmacêutica (pomada, loções, géis, cremes, sabões, detergentes, sólidos, ...)
- Petróleo (fluido de perfuração, petróleo, gases,

água)

- Papel e celulose (pastas)
- Alimentícia (sucos, gases de refrigeração, queijos, gelatinas, cremes ...)
- Plástico (polímero fundido, blendas, compósitos, ...)
- Tintas (óxidos, polímeros, solventes, ...)
- Cerâmica (concretos, barbotina, ...)
- Cosmético (cremes, géis, pastas, xampu, ...)
- ...

11

Tensão e Deformação



12

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

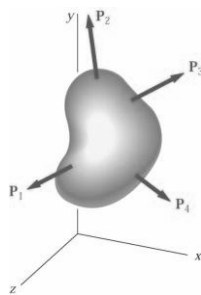
- Quando um fluido está em movimento existem vários tipos de **forças** atuando sobre ele.

Essas forças estão relacionadas com a tensão, já que por definição a tensão τ em um ponto:

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad \Delta F \text{ é a força atuando na área } \Delta A.$$

13

Tensão e Deformação

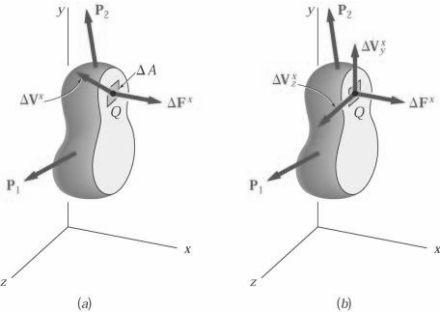


Considere-se um corpo sujeito a várias cargas $P_1, P_2, \text{ etc.}$ Para compreender o estado de tensão criado por estas cargas num ponto genérico Q **localizado no interior do corpo, seccione-se este através de um plano paralelo ao plano yz e que inclua Q .** A parte do corpo à direita da secção é sujeita a algumas das cargas originais e a esforços normal e transversal aplicados na secção.

14

Tensão e Deformação

Denote-se por ΔF^x e ΔV^x respectivamente, as forças normal e tangencial que atuam numa área elementar ΔA na vizinhança do ponto Q . Note-se que o sobrescrito x é utilizado para indicar que as forças ΔF^x e ΔV^x atuam numa superfície perpendicular ao eixo x .



Enquanto que a força ΔF^x tem uma direção perfeitamente definida, a força ΔV^x pode ter qualquer direção do plano de secçãoamento. Decomponha-se, então, ΔV^x nas duas componentes, ΔV_y^x e ΔV_z^x nas direções paralelas aos eixos y e z , respectivamente.

15

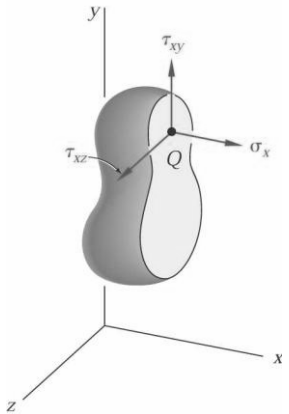
Tensão e Deformação

Dividindo agora o módulo de cada força pela área ΔA e fazendo ΔA tender a zero, definem-se as três componentes da tensão mostrada na figura abaixo.

$$\sigma_x = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F^x}{\Delta A}$$

$$\tau_{xy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V_y^x}{\Delta A}$$

$$\tau_{xz} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta V_z^x}{\Delta A}$$



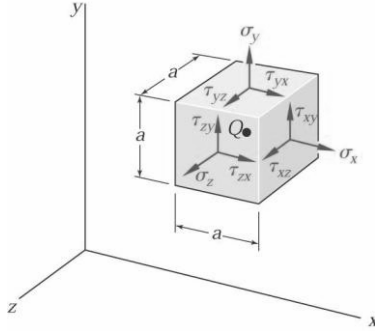
Notas: σ (sigma); τ (tau); o primeiro índice em σ_x ; τ_{xy} e τ_{xz} indica que as tensões consideradas atuam numa superfície perpendicular ao eixo x . O segundo índice identifica a direção da componente da tensão.

16

Tensão e Deformação

Repetindo o processo e obtendo uma seção paralela ao plano xz e xy passando pelo ponto Q tem-se:

Note que apenas 3 faces do cubo são visíveis na figura ao lado. Nas três faces "invisíveis" atuam componentes da tensão iguais, mas opostas.

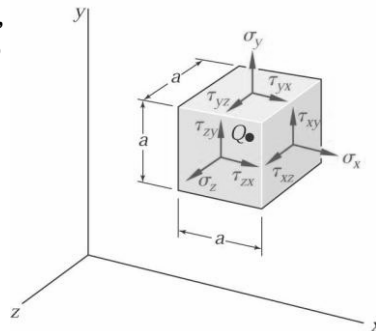


17

Tensão e Deformação

As componentes da tensão indicadas na figura ao lado são σ_x , σ_y e σ_z , que representam a tensão normal em faces perpendiculares aos eixos x , y e z .

As seis componentes da tensão tangencial τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} , τ_{yx} , τ_{zx} e τ_{zy}



τ_{xy} = representa a componente y da tensão tangencial exercida sobre a face perpendicular ao eixo x .

τ_{yx} = representa a componente x da tensão tangencial exercida sobre a face perpendicular ao eixo y .

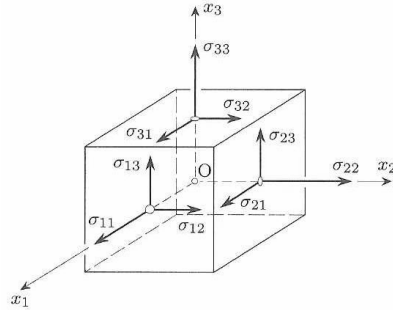
18

Tensão e Deformação

Para descrever o estado de tensão em um ponto é necessário conhecer o vetor tensão em três faces paralelas aos planos coordenados que passam pelo ponto. A descrição do estado de tensão em um ponto faz-se através da identificação de nove componentes

Estas componentes podem ser guardadas em uma matriz, onde cada linha corresponde a um vetor tensão em uma face.

$$[\sigma_{ij}]_{[0,x_1,x_2,x_3]} = \sigma_{[0,x_1,x_2,x_3]} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$



19

Tensão e Deformação

Quando:

$i=j$

- são chamadas de componentes normais da tensão, também conhecidas como tensões normais, sendo que atuam na direção normal à face do elemento de fluido.
- dependendo do sinal (+ ou -) estas tensões tendem a aumentar (ou alongar ou tracionar) ou diminuir (ou comprimir) o elemento de volume

$i \neq j$

- são chamadas de componentes de cisalhamento, também conhecidas como tensões de cisalhamento.
- atuam em direção paralela a uma dada face do elemento de fluido.

20

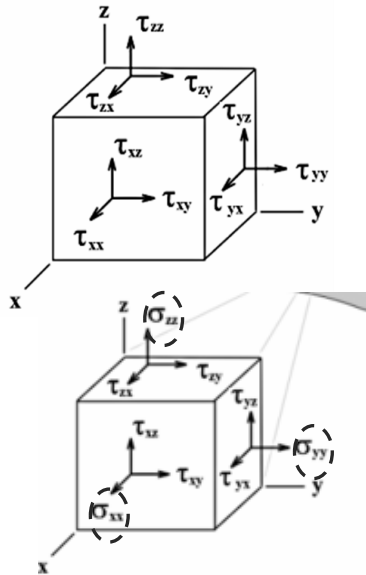
Tensão e Deformação

É possível mostrar que o tensor tensão possui propriedade de simetria, ou seja, $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$.

Conseqüentemente, para determinar o estado de tensão de um corpo onde não há a resultante de cisalhamento, é preciso conhecer somente seis componentes do tensor tensão: **três componentes normais e três componentes de cisalhamento**.

21

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação



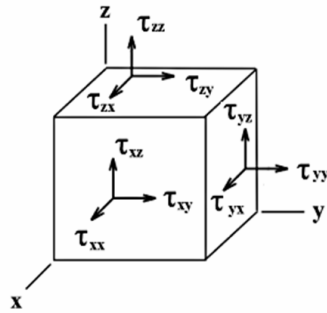
Quando:

τ_{ij} para $i=j$ tem-se as componentes normais da tensão, também conhecidas como tensões normais.

Se forem positivas tendem a alongar o elemento de volume.
Se forem negativas tendem a comprimir o elemento de volume

22

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação



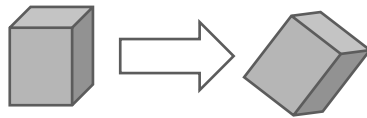
Quando:

τ_{ij} para $i \neq j$ tem-se as componentes de cisalhamento da tensão, também conhecidas como tensões cisalhantes.

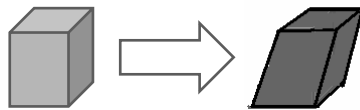
23

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

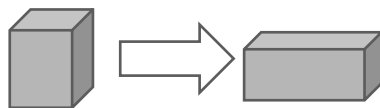
O conceito de deformação está associado a mudança de forma de um corpo.



a) rotação sem deformação



b) deformação por cisalhamento



c) deformação alongacional

24

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

- A energia na forma de tensão normal (σ) ou tangencial (τ) gera deformações elongacionais (ϵ) ou cisalhantes (γ) respectivamente, ou uma combinação das duas, quando tensões normais e tangenciais estiverem presentes simultaneamente.

A taxa, ou a frequência com que ocorre a deformação elongacional é definida como $\dot{\epsilon}$; a taxa ou a frequência da deformação cisalhante é definida como $\dot{\gamma}$.

A resistência ao fluxo ou a deformação oferecida pelo material é definida como viscosidade (λ ou η) e é um fator de proporcionalidade entre energia (tensão: σ ou τ) e a frequência (taxa de deformação: $\dot{\epsilon}$ ou $\dot{\gamma}$).

25

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

1.1 – Deformação por cisalhamento simples (γ_{xy})

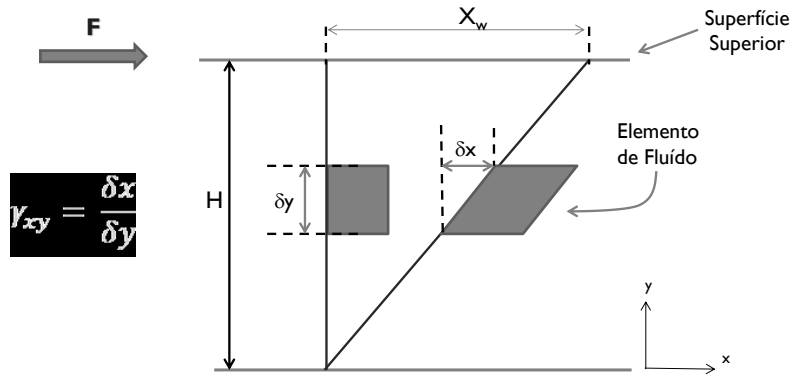
Considere um fluido colocado entre duas superfícies paralelas e a superfície superior se desloca a uma distância X_w em relação à placa inferior.

Admitindo que a distância entre as superfícies paralelas seja H e que não há escorregamento do fluido na superfícies, i.e., cada elemento de fluido estará sujeito a mesma deformação local.

26

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

1.1 – Deformação por cisalhamento simples (γ_{xy})



onde δy é a altura do elemento de fluido antes do deslocamento da superfície superior e δx é o deslocamento superior desse elemento de fluido na direção x .

27

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

1.1 – Deformação por cisalhamento simples (γ_{xy})

Se **H** for muito pequeno, a **deformação de cisalhamento** poderá ser **considerada linear e será independente do tamanho do elemento**, podendo ser expressa como:

$$\gamma_{xy} = \frac{X_w}{H}$$

28

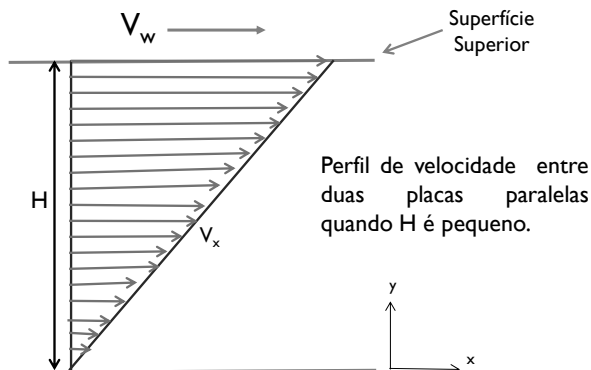
Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

1.2 – Taxa de deformação por cisalhamento

▪ **Materiais líquidos entre duas placas paralelas, onde a placa superior desloca-se a uma velocidade constante V_w na direção x .**

□ Se H for pequeno, a velocidade do material v_x em qualquer ponto y é:

$$v_x = \left(\frac{y}{H}\right) V_w$$



29

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

1.2 – Taxa de deformação por cisalhamento

A taxa de cisalhamento é definida como a variação da velocidade das camadas em relação à distância entre camadas.

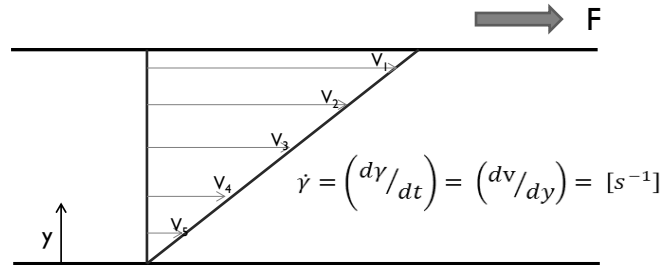
$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma_{xy}}{dt} \quad \text{ou} \quad \dot{\gamma} = \left(\frac{dy}{dt}\right) = \left(\frac{dv}{dy}\right) = [s^{-1}]$$

A taxa de cisalhamento é definida como a variação da velocidade das camadas em relação à distância entre camadas.

30

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

1.2 – Taxa de deformação por cisalhamento



Força de cisalhamento atuando em um corpo

Na superfície superior, em que $y=H$ e $v_x=V_w$ tem-se:

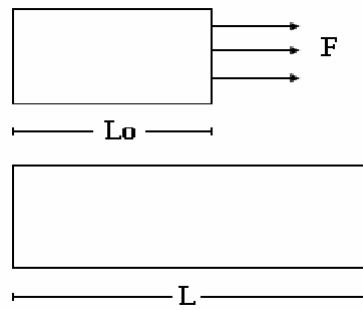
$$\dot{\gamma} = \frac{V_w}{H}$$

31

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

2 – Componentes normais da taxa de deformação (taxas de deformação elongacionais)

Normalmente este tipo de deformação é provocada por tensões normais ($i=j$).



32

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

2 – Componentes normais da taxa de deformação (taxas de deformação elongacionais)

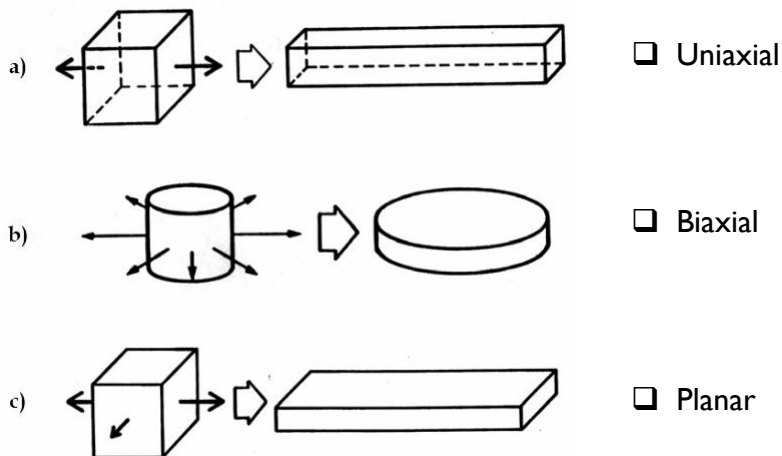
Os fluxos elongacionais são classificados por meio da direção na qual se produz o alongamento. A figura seguinte mostra as diferentes geometrias de fluxos elongacionais.

- a) **Uniaxial:** apresenta deformação e tensão resultante na direção do eixo de simetria;
- b) **Biaxial:** apresenta deformação na direção radial ao fluxo, devido a uma compressão na direção do eixo de simetria;
- c) **Planar:** a velocidade em uma das direções cartesianas é zero.

33

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

2 – Componentes normais da taxa de deformação (taxas de deformação elongacionais)

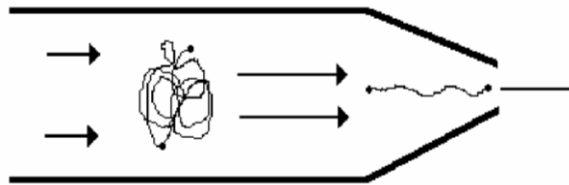


34

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

2 – Componentes normais da taxa de deformação (taxas de deformação elongacionais)

Entretanto, o fluxo elongacional não ocorre apenas em sólidos. Ele aparece durante o processamento de polímeros (portanto, fluido) em canais convergentes.



35

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

◦ De acordo com o que foi apresentado até agora, temos basicamente 3 tipos de deformação:

- 1) Por cisalhamento simples, onde ocorre a deformação pela mudança de forma, sem alterar o volume;
- 2) Por compressão ou dilatação, onde é aplicada uma tensão normal sobre uma área do corpo e ocorre variação do volume e não da forma.
- 3) Combinação dos anteriores, quando há alteração tanto da forma como do volume quando são aplicadas tensões tangenciais e normais conjuntamente em uma área do corpo. Em fluidos, como os polímeros fundidos, ocorre deformação cisalhante quando este escoar em roscas (extrusão). O fluxo elongacional acontece quando o polímero fundido escoar através de canais convergentes e divergentes, ou quando a massa polimérica é estirada (sopro de garrafas, sopro de filme tubular, filme planar orientado).

36

Tensão, Deformação e Taxa de Deformação

▪ Deformação e Módulo para um Material Sólido

Os três modos principais pelos quais o material sólido está sujeito a uma deformação são:

- Tração;
- Cisalhamento e
- Compressão

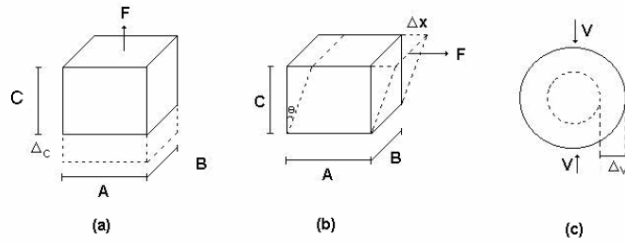
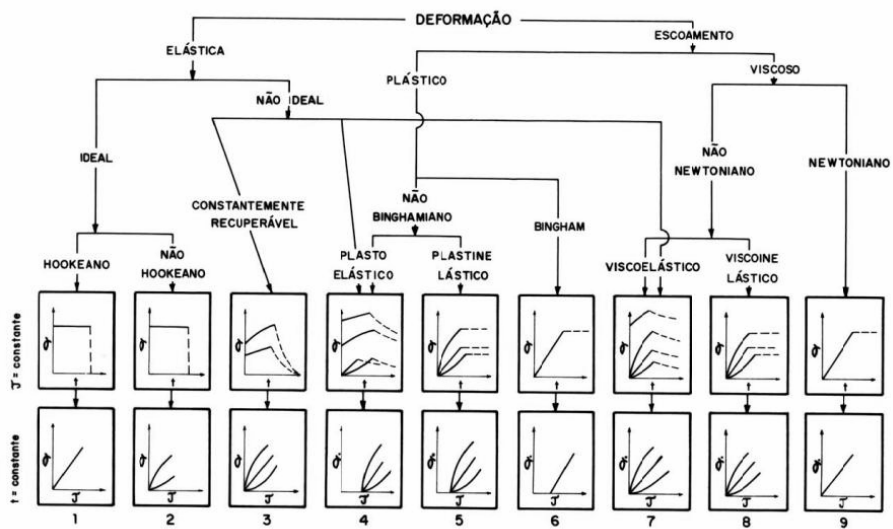



Figura 3 – Deformação por (a) Tração, (b) cisalhamento e (c) compressão.

37

Classificação Reológica dos Materiais



38



A descrição fenomenológica das propriedades reológicas de um polímero tem por base a definição de três tipos ideais de materiais:

▪ **materiais viscosos:** os quais durante a deformação **dissipam** todo o trabalho externo aplicado.

▪ **materiais elásticos:** os quais **armazenam** todo o trabalho externo aplicado.

▪ **materiais viscoelásticos:** os quais **dissipam e armazenam** todo o trabalho externo aplicado.

39



☐ Efeitos Não-Newtonianos observados em Polímeros

A viscoelasticidade é um comportamento ou resposta à deformação onde ao mesmo tempo, observa-se comportamento viscoso (o corpo se deforma e não recupera nada da deformação depois de retirada a tensão) e comportamento elástico (ocorre total recuperação da deformação depois de retirada a tensão).

Desta forma a parcela elástica pode ser responsável por vários efeitos mesmo em fluídos e soluções poliméricas.

40

☐ Efeitos Não-Newtonianos observados em Polímeros

Efeito Weissenberg

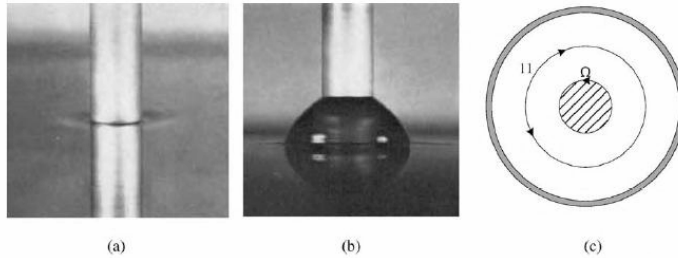


Fig. 3.3 A 9.52-mm D aluminum rod rotating at 10 rps in a wide-diameter cylinder containing (a) Newtonian oil, and (b) polyisobutylene (PIB) solution, which exhibits the rod-climbing Weissenberg effect [from G. S. Beavers and D. D. Joseph, *J. Fluid Mech.*, **69**, 475 (1975)]. (c) Schematic representation of the flow direction flow-induced τ_{11} , causing rod climbing. For Newtonian fluids, $\tau_{11} = 0$, since the small and simple Newtonian fluid molecules are incapable of being “oriented” by the flow.

41

Fluídos Viscoelásticos

Efeito Weissenberg

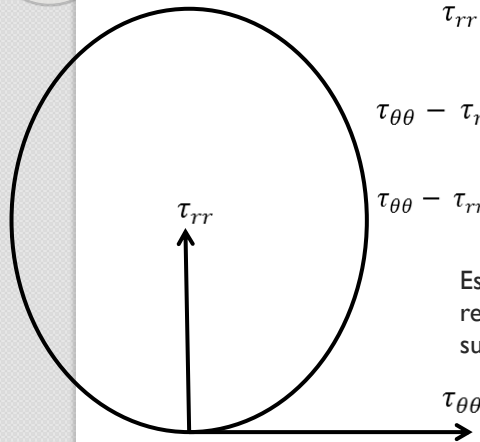
$\tau_{\theta\theta}$ = tensão na direção tangencial

τ_{rr} = tensão na direção radial

$\tau_{\theta\theta} - \tau_{rr} = 0$ para flúidos newtonianos

$\tau_{\theta\theta} - \tau_{rr} < 0$ para flúidos não – newtonianos

Essa diferença nas tensões é a principal responsável pela tendência do fluido em subir pelo bastão.



42

Flúidos Viscoelásticos

Efeito Sifão

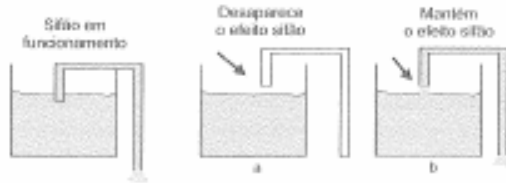


Figura 2.3 - Efeito sifão: a) flúido Newtoniano, b) solução polimérica flui no sifão situado acima do nível do líquido no recipiente

43

Flúidos Viscoelásticos

Reemaranhamento

Tubo com um polímero em seu interior.



Gradiente de pressão é aplicado, início do fluxo

Regime Permanente



Retirada do gradiente de pressão

Recuo do fluxo



Recuo do fluxo

Este efeito “incomum” permite analisar qualitativamente o conceito de viscoelasticidade e memória.

44

Fluídos Viscoelásticos

Reemaranhamento

◦ **A habilidade com que um material recupera suas dimensões originais pode ser chamada de memória.**

Um polímero possui memória quando o seu comportamento no tempo atual é dependente de toda a história termomecânica anterior à qual ele foi submetido e, se em repouso, ele tentará voltar pelo mesmo caminho às conformações aleatórias de equilíbrio.

Para isto ele tem que ter a capacidade de armazenar energia (elasticidade). A energia armazenada permite que o polímero tente voltar ao estado inicial de conformação, mas durante esta tentativa, haverá também dissipação de energia na forma de calor (viscosidade), a qual retardará e parcialmente impedirá a recuperação total.

Corpo puramente elástico \Rightarrow memória perfeita.

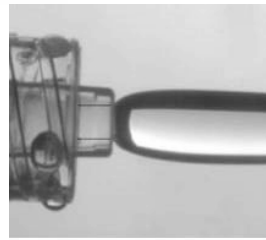
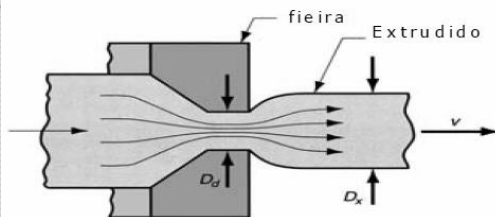
Corpo puramente viscoso \Rightarrow não tem memória

Polímero \Rightarrow **memória falha.**

45

☐ Efeitos Não-Newtonianos observados em Polímeros

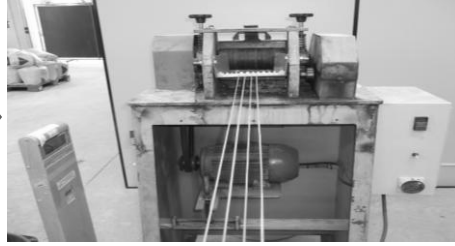
Inchamento do extrudado



46

Fluídos Viscoelásticos

Inchamento do extrudado



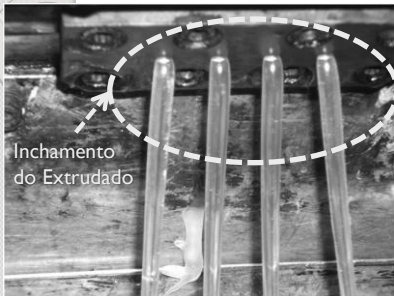
Extrusão de uma blenda de PP/SBS em extrusora dupla rosca co-rotacional.



47

Fluídos Viscoelásticos

Inchamento do extrudado



Extrusão de Polipropileno (PP) puro – detalhe do inchamento do extrudado.

48

Fluídos Viscoelásticos

Inchamento do extrudado



Extrusão de PP Puro



Extrusão da blenda de PP/SBS

49

Efeitos Não-Newtonianos observados em Polímeros

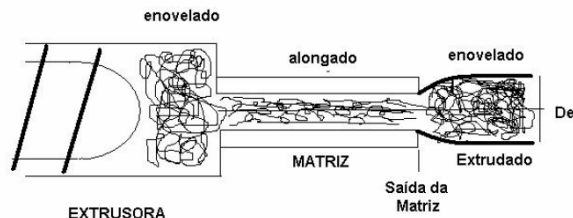
4. Inchamento do extrudado

O inchamento do extrudado é um fenômeno caracterizado pelo aumento do diâmetro do material extrudado em relação ao diâmetro da matriz. Este fenômeno é representado de forma quantitativa pela taxa de inchamento, α , definida por:

$$\alpha = \frac{D_e}{D_m}$$

D_e = diâmetro do extrudado;

D_m = diâmetro da matriz.



50

□ Efeitos Não-Newtonianos observados em Polímeros

◦ Inchamento do extrudado

Ao ser deformado por cisalhamento entre as paredes de uma matriz, o polímero tem suas cadeias orientadas na direção do fluxo, ao mesmo tempo em que tenta recuperar essa deformação elástica dentro da matriz.

Entretanto, há um desequilíbrio entre deformação e recuperação.

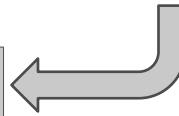


Há uma parcela da deformação que só será recuperada fora da matriz

T, γ , coeficiente de fricção, do comprimento do paralelo da matriz e de seu diâmetro ou espessura



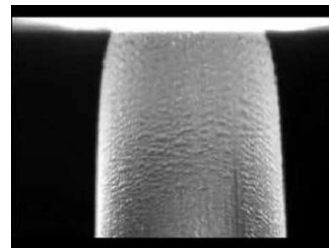
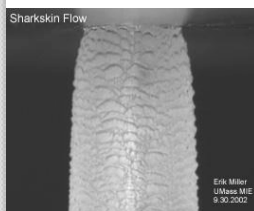
Quantidade a ser recuperada = $f(\text{tempo de relaxação do polímero})$



51

□ Efeitos Não-Newtonianos observados em Polímeros

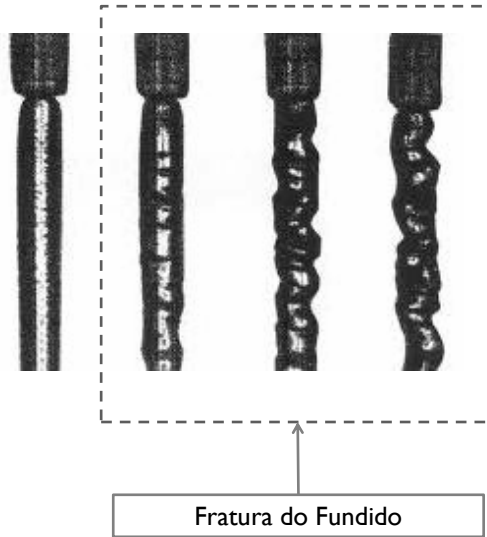
◦ Pele de Cação



52

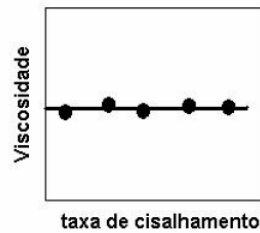
☐ Efeitos Não-Newtonianos observados em Polímeros

◦ 4. Fratura do Fundido



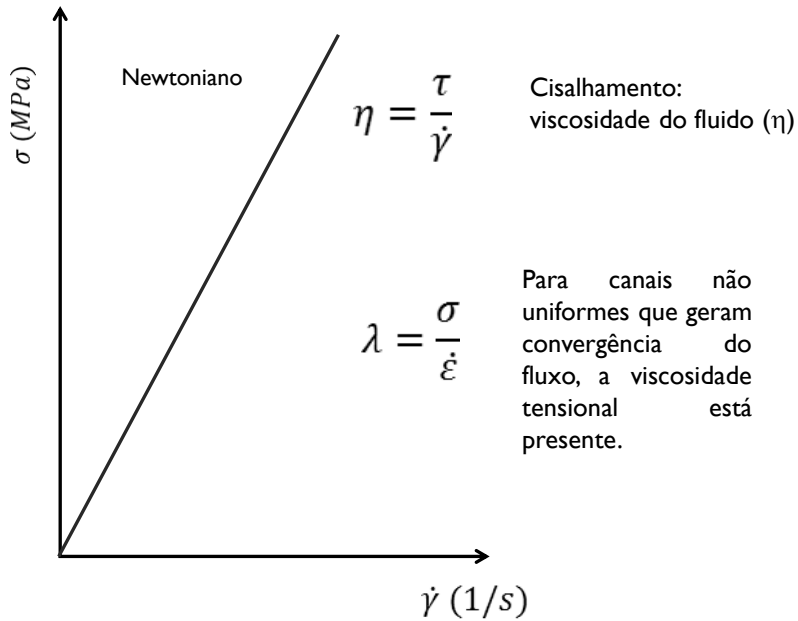
53

Fluídos Newtonianos e Não-Newtonianos



54

Comportamento Newtoniano dos Polímeros sob Deformação

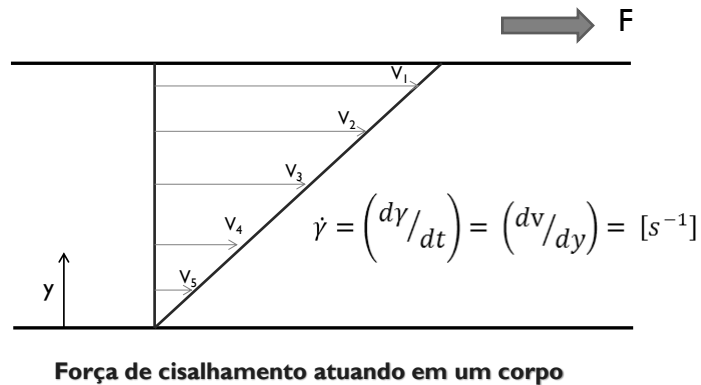


55

Taxa de Cisalhamento ($\dot{\gamma}$)

Considerando duas placas paralelas onde uma delas passa a se mover. O fluido está entre as placas.

A taxa de cisalhamento é definida como a variação da velocidade das camadas em relação à distância entre camadas.



56

Fluídos Não-Newtonianos

Experimentalmente é observado que:

- a maioria dos polímeros apresentam comportamento Newtoniano quando

$$\dot{\gamma} \rightarrow 0$$

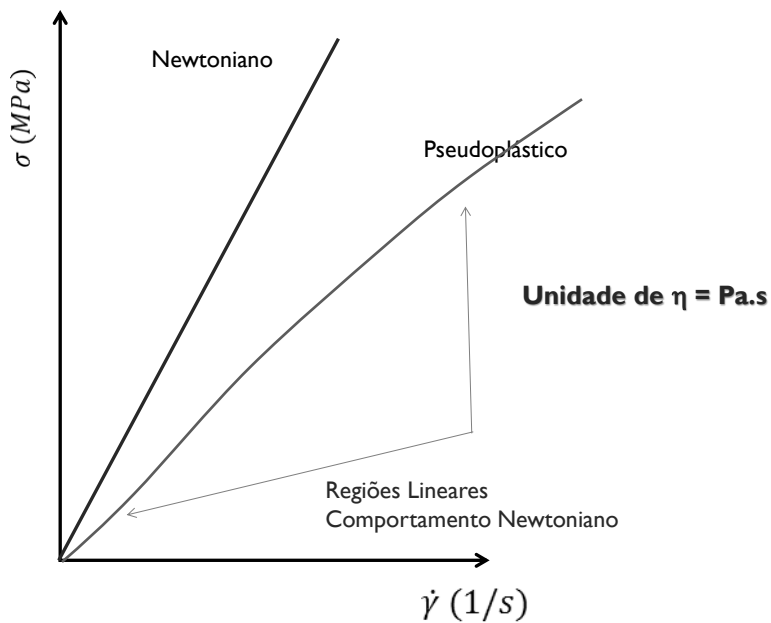
ou

$$\dot{\gamma} \rightarrow \infty$$

A taxas de cisalhamento intermediárias, a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento não é constante.

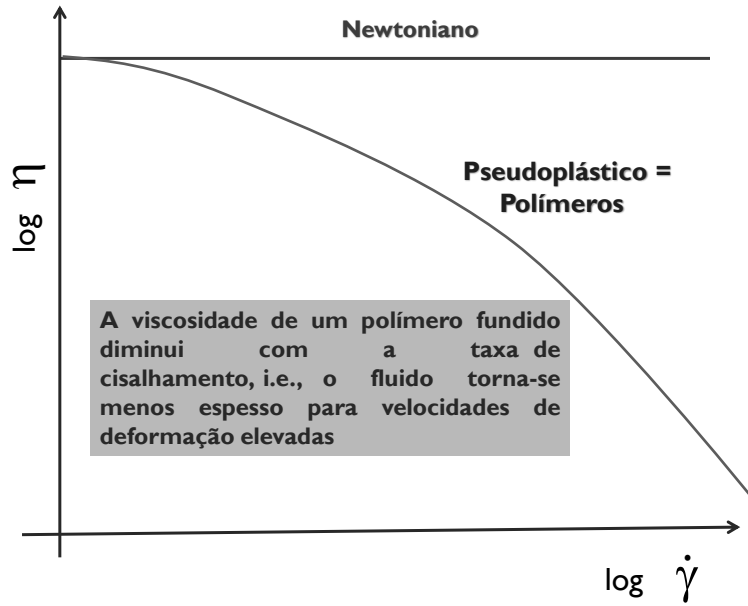
57

Fluídos Não-Newtonianos



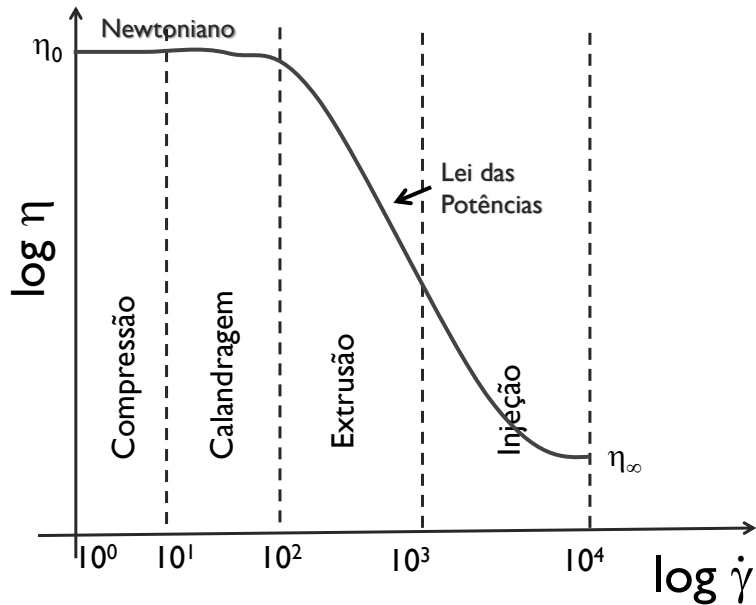
58

Curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento



59

Relação entre taxas de cisalhamento e processos de fabricação



60

☐ Fluido da Lei das Potências

- Na região entre η_0 e η_∞ a viscosidade pode ser representada pela chamada Lei das Potências, expressa pela seguinte equação:

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma}^n$$

$$\eta = m \dot{\gamma}^{n-1}$$

onde **m** e **n** são conhecidos, respectivamente, como **consistência** e **índice da Lei das Potências**.

$$\log \tau = \log \eta_0 + n \log \dot{\gamma}$$

61

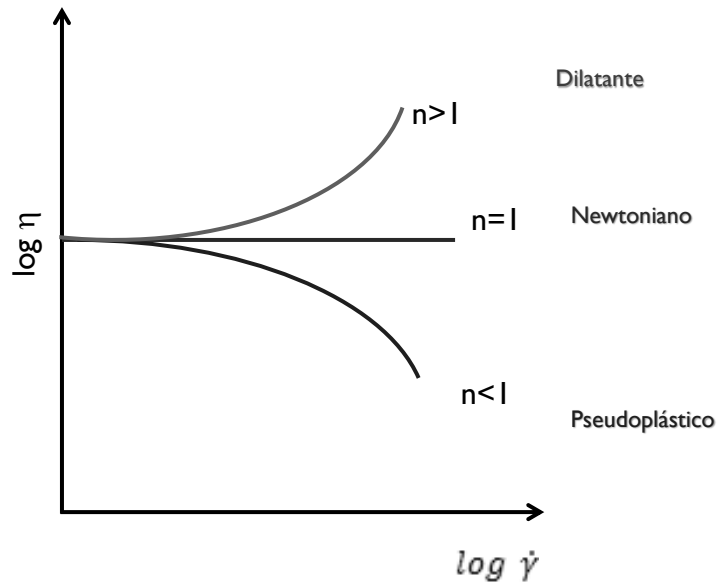
☐ Fluido da Lei das Potências

$$\log \tau = \log \eta_0 + n \log \dot{\gamma}$$

onde $\log \eta_0$, que é o cruzamento no eixo y, representa a consistência do polímero a uma determinada temperatura para taxa de cisalhamento de 1 seg^{-1} e “n” é o fator de potência ou medida da pseudoplasticidade.

62

- Outras relações entre viscosidade e taxa de cisalhamento observadas em materiais poliméricos



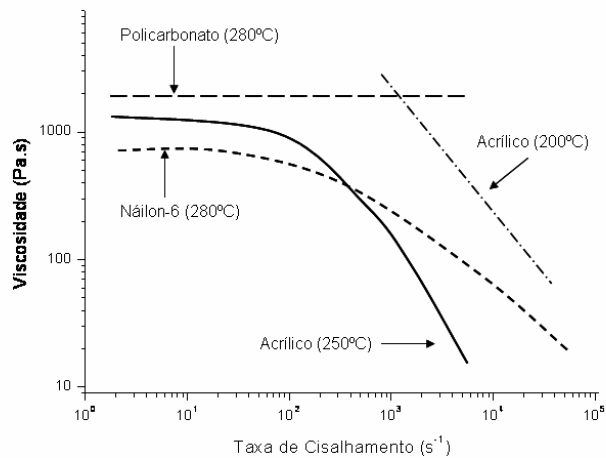
63

- Outras relações entre viscosidade e taxa de cisalhamento observadas em materiais poliméricos

- Comportamento Dilatante: soluções e emulsões de PVC e em alguns polímeros carregados.
- Comportamento Newtoniano: polímeros fundidos a baixas taxas de cisalhamento. Alguns polímeros, como por exemplo o policarbonato, podem exibir este comportamento mesmo a altas taxas de cisalhamento.
- Comportamento Pseudoplástico: a maioria dos polímeros fundidos a altas taxas de cisalhamento.

64

☐ Outras relações entre viscosidade e taxa de cisalhamento observadas em materiais poliméricos



65

☐ Medidas das Propriedades Reológicas de Polímeros

1. Índice de Fluidez do Fundido (MFI)
2. Reometria Capilar
3. Reometria de Placas Paralelas ou Cone-Placa ou ainda Cilindros Concentricos
4. Reometria de Torque
5. Outras (Reometria Elongacional, Imagem por Ressonância Magnética Nuclear, Velocimetria por Ultrassom).

66

Medidas das Propriedades Reológicas de Polímeros

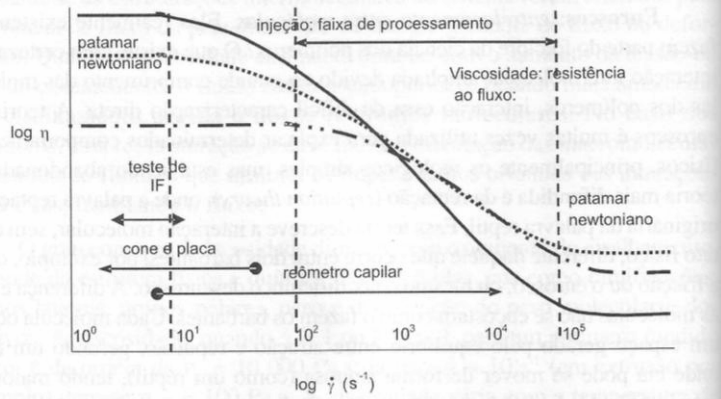
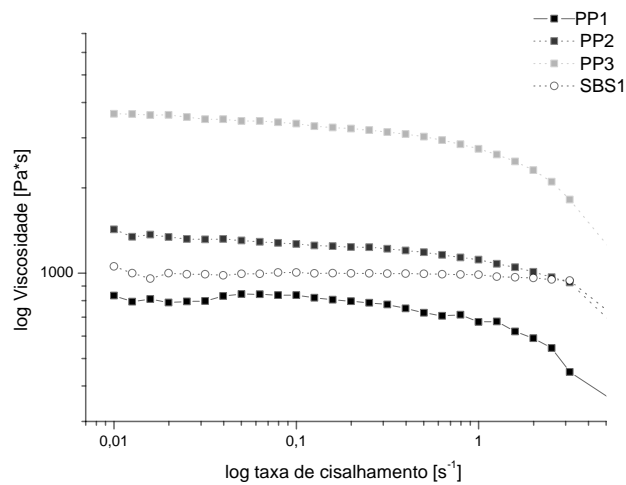


Figura 2.18 - Curvas típicas de viscosidade para diferentes faixas de taxas de cisalhamento obtidos em reômetros e em processos. Reômetros capilares medem valores de taxas de cisalhamento maiores que reômetros de cone-placa, por exemplo. Para obter um espectro amplo desses valores, mais de um equipamento se torna necessário. As três curvas mostram que os patamares e as inclinações mudam de polímero para polímero, bem como com as mudanças de temperaturas

67

Medidas das Propriedades Reológicas de Polímeros

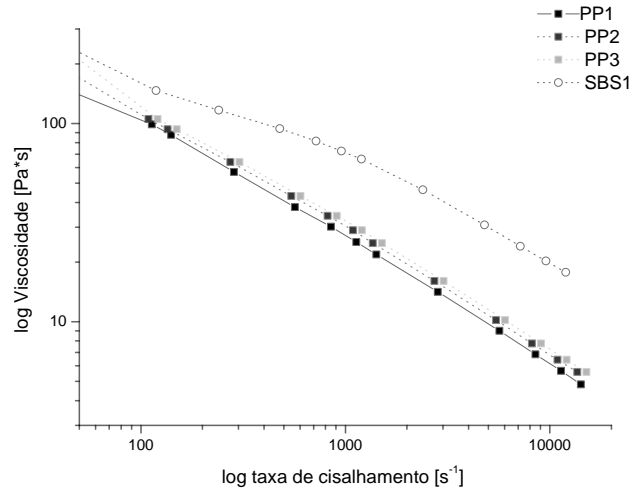
I. Reômetro Cone-Placa



68

Medidas das Propriedades Reológicas de Polímeros

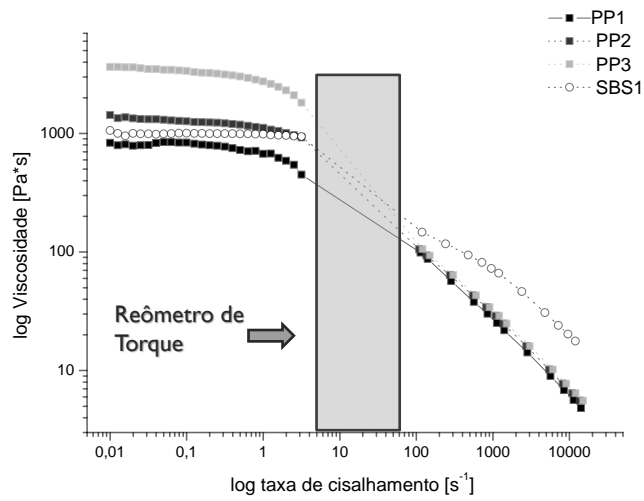
2. Reômetro Capilar



69

Medidas das Propriedades Reológicas de Polímeros

Reômetro Cone-Placa e Reômetro Capilar



70

Medidas das Propriedades Reológicas de Polímeros

A previsão da processabilidade de um polímero com base somente no MFI deve ser vista com cautela.

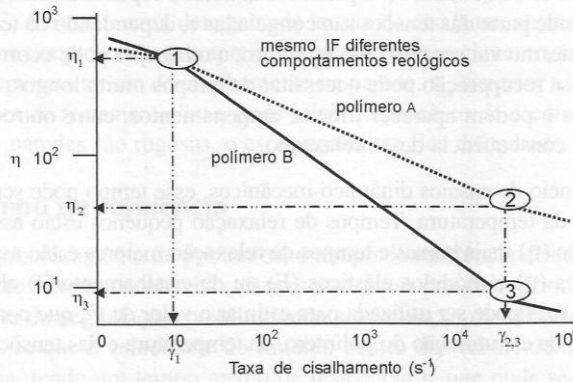
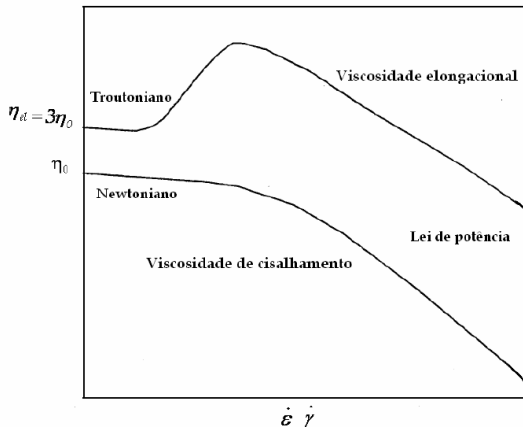


Figura 2.32 - Comparação entre índice de fluidez (IF) e curva reológica de polímeros pseudoplásticos. IF sempre é uma medida a valores baixos de $\dot{\gamma}$

71

Viscosidade Elongacional

Quando um fluido é submetido a fluxos elongacionais e sua viscosidade elongacional não varia com a taxa de elongação, o fluido é chamado de **Troutoniano**.



Na região onde a viscosidade elongacional é constante temos:

$$\eta_e = 3 \eta_0$$

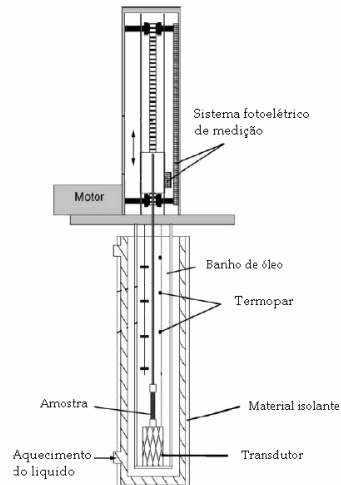
Em altas taxas de deformação, o polímero segue a Lei de Potências.

72

Métodos de avaliação da viscosidade elongacional

- As medidas de viscosidade elongacional são muito difíceis de serem realizadas, devido à limitações experimentais

Reômetro de Münstedt



73

Fluxos Elongacionais

◦ Temos ainda:

- Reômetro de Meissner
- Rheotens
- Sentmanat Extensional Rheometer (SER)

74

Fluxos Simples Encontrados no Processamento de Polímeros

- No processamento de polímeros pode-se dividir os tipos de fluxos em três categorias diferentes, de acordo com o tipo de força principal imposta ao polímero fundido.

Na maioria das vezes o polímero é conformado no estado fundido, por meio de geometrias complexas. Desta forma os tipos de fluxos podem estar combinados.

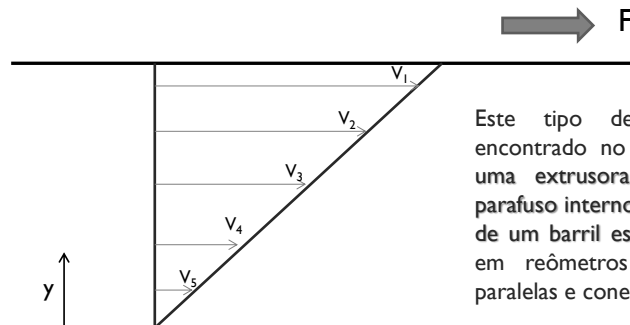
Tipos de Fluxo:

1. Fluxo de Arraste
2. Fluxo de Pressão
3. Fluxo Elongacional

76

I. Fluxo de Arraste

- Esse tipo de fluxo ocorre em razão do movimento de uma das superfícies em que o polímero está confinado. O polímero se movimenta pelo arraste proporcionado pela superfície móvel.



Este tipo de fluxo é encontrado no interior de uma extrusora, onde um parafuso interno gira dentro de um barril estacionário e em reômetros de placas paralelas e cone e placa.

Força de cisalhamento atuando em um corpo

77

2. Fluxo de Pressão

- Fluxos de pressão são fluxos em que um gradiente de pressão ΔP é aplicado ou imposto ao sistema.

Fluxo de um fluido Newtoniano através de um tubo

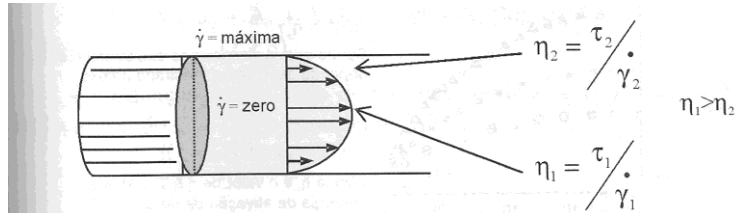


Figura 2.19 - O perfil de velocidades causado por diferença de pressão é parabólico. Isso causa variação da taxa cisalhante ao longo do raio do cilindro. Nos locais de maior cisalhamento, ocorre maior decréscimo da viscosidade, e nas paredes das ferramentas o cisalhamento é máximo

78

2. Fluxo de Pressão

Fluxo de um fluido Newtoniano através de um tubo

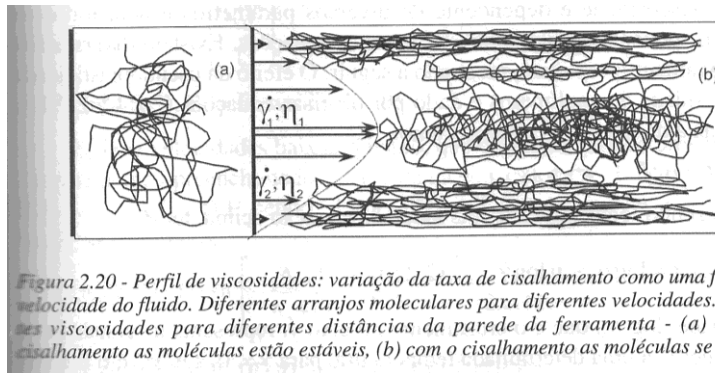


Figura 2.20 - Perfil de viscosidades: variação da taxa de cisalhamento como uma função da velocidade do fluido. Diferentes arranjos moleculares para diferentes velocidades. Diferentes viscosidades para diferentes distâncias da parede da ferramenta - (a) antes do cisalhamento as moléculas estão estáveis, (b) com o cisalhamento as moléculas se orientam

79

2. Fluxo de Pressão

Fluxo de um fluido Não-Newtoniano através de um tubo

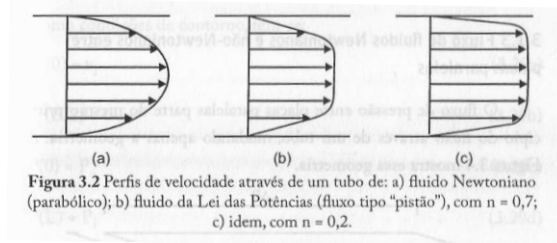


Figura 3.2 Perfis de velocidade através de um tubo de: a) fluido Newtoniano (parabólico); b) fluido da Lei das Potências (fluxo tipo "pistão"), com $n = 0,7$; c) idem, com $n = 0,2$.

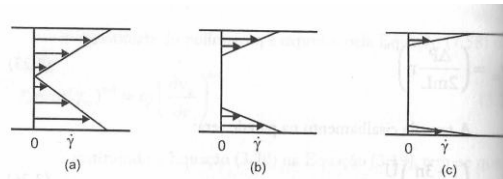


Figura 3.3 Perfis de taxa de cisalhamento através de um tubo de: a) um fluido Newtoniano; b) um fluido da Lei das Potências, com $n = 0,7$; c) idem, com $n = 0,2$.

80

2. Fluxo de Pressão

O Fluxo de Pressão ocorre em canais de moldes e (processo de injeção) e em matrizes de extrusão. É conhecido também como **Fluxo Poiseuille**

De acordo com o que foi visto anteriormente é responsável pela pouca orientação no centro de peças de compósitos polímeros/fibras de vidro através de matrizes circulares e, da morfologia "pele-núcleo" (esferulitos grandes no centro e lamelas altamente orientadas perto da parede) observada em moldados por injeção cilíndricos.

81

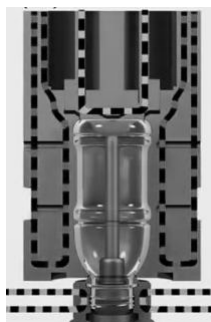
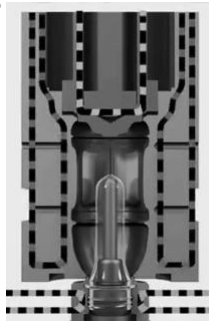
3. Fluxo Elongacional

- A **viscosidade elongacional**, **viscosidade extensional** ou ainda **viscosidade em regime permanente de alongação** permite conhecer a resistência ao fluxo dos polímeros em campos deformacionais de alongação ou campos deformacionais livres de cisalhamento.

Este tipo de fluxo ocorre quando o polímero flui em regiões convergentes da matriz, ou ainda quando é **termoformado** ou **soprado** devido à forças normais atuando sobre a massa fundida.

82

3. Fluxo Elongacional



Extrusão-sopro

Filmes Biorientados



83

3. Fluxo Elongacional

- Este tipo de fluxo é encontrado principalmente no processo de **fição de fibras poliméricas**, no **sopro de filmes biaxialmente orientados** e no **sopro de “parisons” para garrafas**.

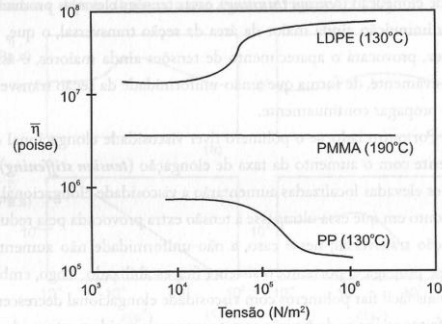


Figura 4.8 Viscosidade elongacional *versus* taxa de elongação para três polímeros diferentes [18].

84

3. Fluxo Elongacional

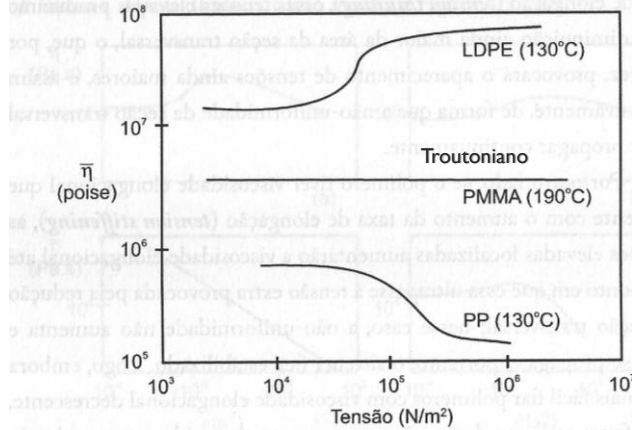
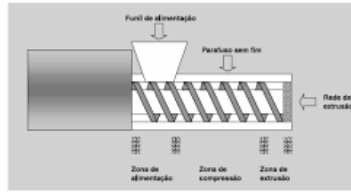


Figura 4.8 Viscosidade elongacional *versus* taxa de elongação para três polímeros diferentes [18].

85

- Exercício

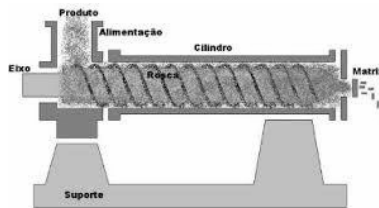
- Tipos de fluxo encontrados nos seguintes processos (ou componentes)



Extrusora sem Matriz
(no interior de uma extrusora)

86

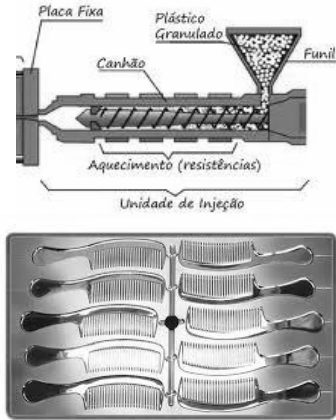
- Tipos de fluxo encontrados nos seguintes processos (ou componentes)



Matriz

87

❑ Tipos de fluxo encontrados nos seguintes processos 9ou componentes)

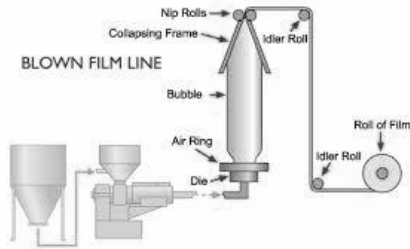


Injetora (interior de uma injetora)

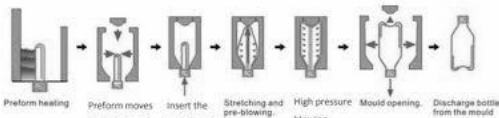
Molde de injeção

88

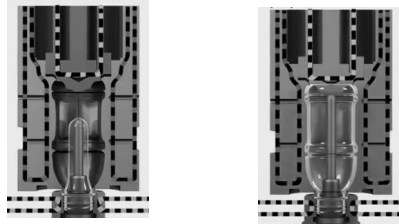
❑ Tipos de fluxo encontrados nos seguintes processos (e em componentes)



Extrusão-sopro

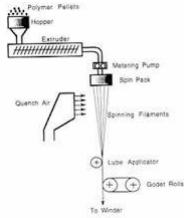


Injeção-sopro

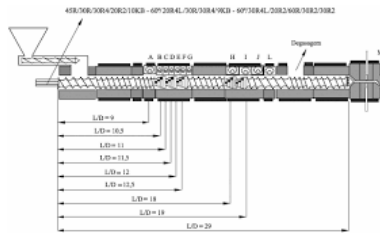


89

☐ Tipos de fluxo encontrados nos seguintes processos



Fiação

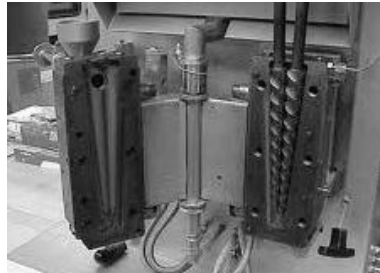


Extrusora dupla rosca

Figura 1. Configuração da rosca e localização dos coletores.

90

☐ Tipos de fluxo encontrados nos seguintes processos



Extrusora modificada
(laboratório)

91