

# Protocolos e problemas para as aulas práticas de

## **Reologia e Estrutura dos Alimentos**

**5º Semestre da licenciatura em Engenharia Alimentar**

**Isabel Sousa**

**Mara Lino Pereira**

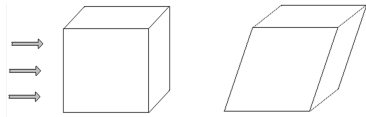
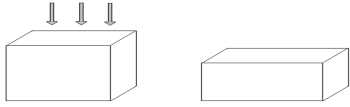
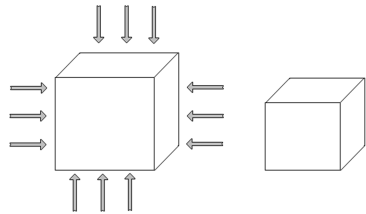
**2010**

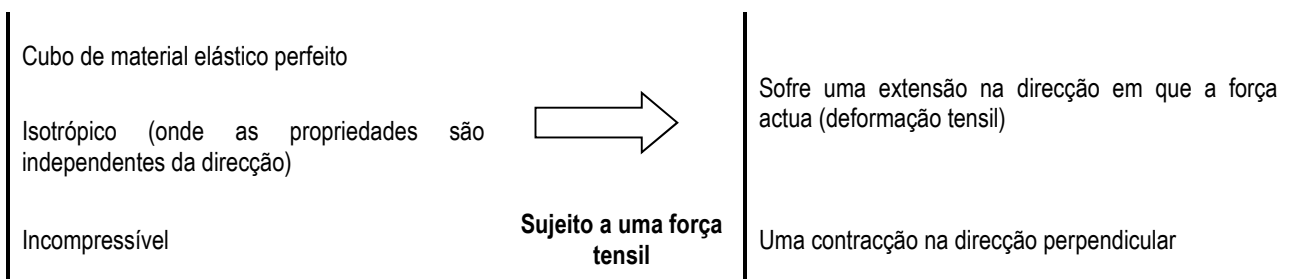
### Protocolo 1: Determinação do Módulo de Rigidez - Módulo de Young

Lei de Hooke:

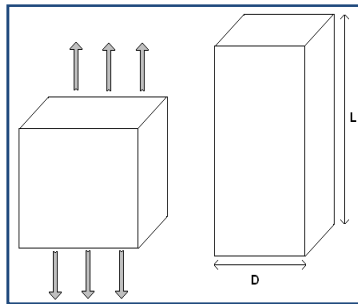
$$\tau = cte \times \gamma$$

$\tau$  Tensão tangencial (N.m<sup>-2</sup> ou Pa)  
 $cte$  *Modulus* ou módulo elástico (N.m<sup>-2</sup> ou Pa)      Equação [1]  
 $\gamma$  Deformação distorcional (adimensional)

Deformação	Tensão	Módulo	Equação	
	Tangencial	Elástico tangencial (G)	$\tau = G \cdot \gamma$	Equação [2]
	Compressão	Young (E)	$\sigma = E \cdot \gamma$	Equação [3]
	Volumétrica	Elástico volumétrico (k)	$P = K \cdot \frac{\Delta \vartheta}{V}$	Equação [4]



Poisson verificou que nestes casos, corpo elástico, isotrópico e incompressível, a contracção é metade da extensão (equação 5):



$$\frac{\frac{\Delta d}{D}}{\frac{\Delta l}{L}} = 0,5$$

**Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )**

Equação [5]

Módulos elásticos podem relacionar-se entre si:

$$E = \frac{9GK}{3K + G} \quad \text{Equação [6]}$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad \text{Equação [7]}$$

$$E = 3K(1 - 2\nu) \quad \text{Equação [8]}$$

A relação tensão/ deformação de compressão - **Módulo de Young (E)**, representa a dureza do material quando sujeito a uma carga, para valores superiores do módulo de Young significa que é necessária uma tensão superior para provocar uma determinada deformação.

#### Teste de compressão:

Velocidade de compressão constante

Mede-se a força necessária para a compressão da amostra

Determina-se a tensão e deformação para cada momento  $t$ , sabendo as dimensões da amostra

Para o cálculo da tensão em função da deformação deve-se efectuar uma correcção devido à mudança de área da amostra de ensaio

Para um material incompressível, a correcção pode-se realizar facilmente tomando o valor da área superficial após realização do teste ( $A_t$ )

$$A_t = A_0 \frac{L_0}{L_0 - \Delta L}$$

$A_t$	Área da amostra em dado momento $t$ (m <sup>2</sup> )
$A_0$	Área inicial da amostra (m <sup>2</sup> )
$L_0$	Altura inicial da amostra (m)
$\Delta L$	Varição da altura experimentada pela amostra (m)

Equação [9]

A medida mais simples de deformação é a deformação de Cauchy e é definida por  $\varepsilon_c$ :

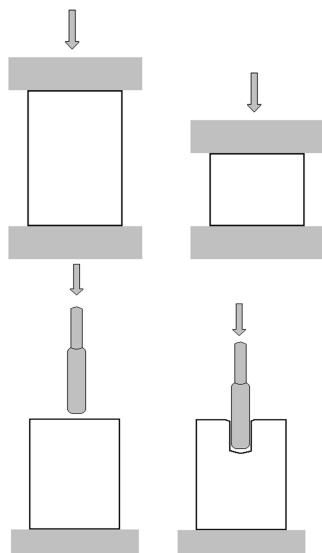
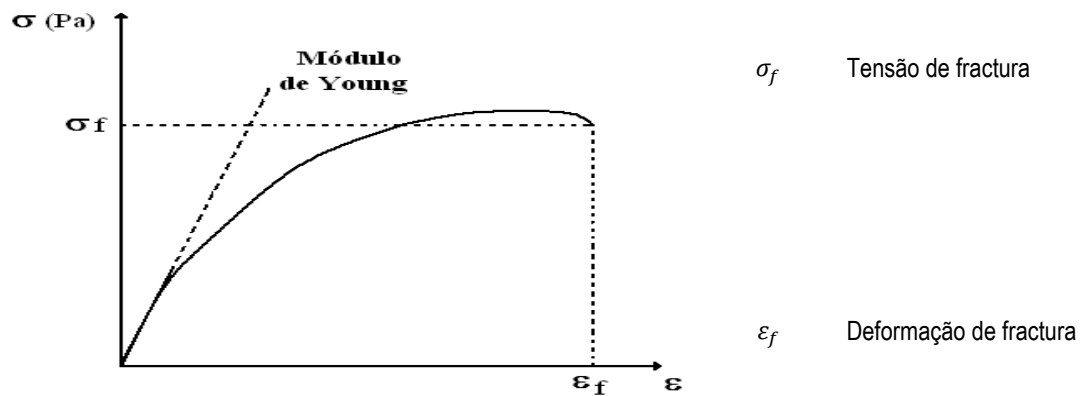
$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{Equação [10]}$$

Esta medida de deformação aplica-se apenas para deformações pequenas, isto é, quando inferiores a 0,1.

Quando a deformação é maior deve-se utilizar a deformação de Henky, definida por  $\varepsilon_H$ :

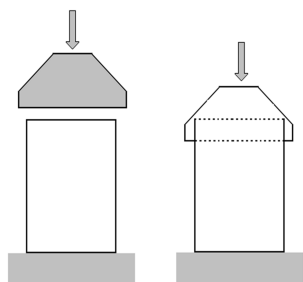
$$\varepsilon_H = \ln \left[ \frac{L_t}{L_0} \right] \quad \text{Equação [11]}$$

O módulo de Young (E) pode-se calcular a partir da curva de tensão vs deformação, através do declive da parte inicial da curva de tensão vs deformação:



Teste de compressão efectuado com uma sonda de dimensões maiores que a amostra - compressão

Teste de compressão efectuado com uma sonda de dimensões mais pequenas do que a amostra - penetração



Teste de compressão efectuado com uma faca - corte

**Procedimento experimental:**

Com o auxílio de uma faca cortar três cubos, com as bases iguais de maçã.

- Condições do texturómetro para o ensaio de compressão:
  - Programar o teste “Measure force in compression – return to start”
  - Calibrar a força e distância
  - Sonda com cerca de 40 mm de diâmetro
  - Condições do teste: velocidade de 1 mm/ s e 20% de compressão
- Condições do texturómetro para o ensaio de penetração:
  - Programar o teste “Measure force in compression – return to start”
  - Calibrar a força e distância
  - Sonda com cerca de 11 mm de diâmetro
  - Condições do teste: velocidade de 1 mm/ s e 8 mm de distância de penetração
- Condições do texturómetro para o ensaio de corte:
  - Programar o teste “Measure force in compression – return to start”
  - Calibrar a força e distância
  - Sonda de faca
  - Condições do teste: velocidade de 1 mm/ s e 8 mm de distância de corte

## **Protocolo 2: Determinação da viscosidade – fluidos Newtonianos**

A viscosidade ( $\eta$ ) de um dado fluido é a propriedade física que traduz a resistência desse material ao escoamento, constituindo assim uma medida do seu atrito interno.

Fluido Newtoniano - sempre que se aplica uma tensão tangencial o fluido começa a escoar com uma taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ) proporcional à tensão ( $\tau$ ) aplicada.

Lei de Newton - a constante de proporcionalidade representa a viscosidade dinâmica do fluido ( $\eta$ ) (Equação 1).

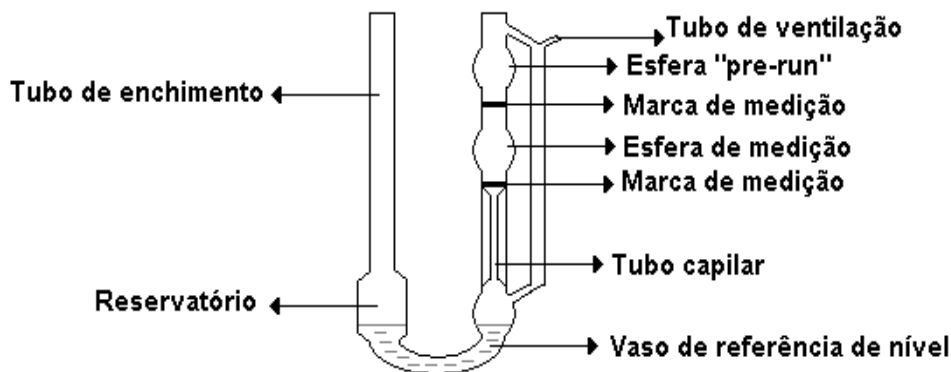
	$\tau$	Tensão (Pa)	
$\tau = \eta \times \dot{\gamma}$	$\eta$	Viscosidade dinâmica (Pa.s)	Equação [1]
	$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação ( $s^{-1}$ )	

Quando a tensão aplicada é removida, a deformação permanece, pois toda a energia fornecida foi dissipada durante o escoamento.

### **Viscosímetro Capilar**

Os viscosímetros capilares são usados para fluidos Newtonianos e consistem num tubo de vidro, de diâmetro reduzido, por onde se faz escoar um fluido, medindo-se o tempo que este demora a passar entre dois pontos.

O movimento do fluido dá-se por diferença de pressão ou devido à gravidade, isto é, devido ao peso do líquido.



**Figura 1 - Viscosímetro de Ubbelohde.**

Os viscosímetros capilares são muito usados em fluidos Newtonianos porque são precisos, simples, baratos e permitem um bom controlo da temperatura.

No entanto, a taxa de deformação varia ao longo do tubo, sendo máxima nas paredes e nula no centro, sendo esta a razão pela qual só se podem utilizar para a determinação da viscosidade em **fluidos Newtonianos**.

O escoamento de um **fluido Newtoniano** através de um capilar segue a lei de Hagen-Poiseuille (equação 2).

$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 \eta L}$	$\frac{dV}{dt}$	Caudal (volume que escoar pelo capilar)	
	$\Delta P$	Diferencial de pressão que origina o escoamento	Equação [2]
	R	Raio do capilar	
	$\eta$	Viscosidade do fluido	

L Comprimento do tubo capilar

Quando medimos então o tempo que o líquido leva a escoar entre dois pontos no tubo situados às alturas  $h_1$  e  $h_2$  a equação [2] pode ser escrita da seguinte forma:

$$t = \frac{\eta}{\rho} \times \frac{8L}{\pi g R^4} \times \int_{h_2}^{h_1} \frac{1}{h} dV = C \times \frac{\eta}{\rho} \quad \text{Equação [3]}$$

$C$  é a constante capilar porque  $L$  e  $R$  são fixos.  
 $h_1$  e  $h_2$  são marcados no tubo de vidro, o volume também se torna constante, ficando tudo incluído em  $C$ .

$$\eta = t \times \frac{\rho}{C}$$

$\eta$  Viscosidade (Pa.s no SI, cP no CGS)  
 $t$  Tempo (s)  
 $\rho$  Massa específica  
 $C$  Constante do capilar

Equação [4]

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{t_1 \times \rho_1}{t_2 \times \rho_2} \quad \text{Equação [5]}$$

Se não conhecermos a constante do aparelho ou o volume exacto para o qual foi determinado mede-se o tempo ( $t$ , em s) que a água “pura” (água bidestilada) demora a percorrer o espaço definido pelos traços do bolbo do viscosímetro e usando exactamente o mesmo volume de líquido cuja viscosidade pretendemos determinar e medimos o tempo que este leva a escorrer, no mesmo intervalo de alturas, exactamente à mesma temperatura obtemos a relação definida na equação 6:

$$\eta_{\text{líquido}} = \frac{t_{\text{líquido}} \times \rho_{\text{líquido}}}{t_{\text{água}} \times \rho_{\text{água}}} \times \eta_{\text{água}} \quad \text{Equação [6]}$$

Este problema não se coloca se estivermos interessados na viscosidade cinemática:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \text{ no SI, Stokes – st no CGS} \quad \text{Equação [7]}$$

$$\nu_{\text{líquido}} = \frac{t_{\text{líquido}}}{t_{\text{água}}} \times \nu_{\text{água}} \quad \text{Equação [8]}$$

### Viscosímetro de Brookfield

A determinação dos parâmetros de escoamento pode ser feita através da medição da viscosidade tangencial para diferentes velocidades de rotação, num viscosímetro rotativo.

Testes preliminares para se verificar qual o elemento de medida (“spindle”) mais adequado ao produto a analisar. Escolha efectuada em função do momento de torção (“torque”) que se obtém para cada elemento, quando imerso no fluido. Uma vez escolhido o elemento mais apropriado deve programar-se o aparelho para esse elemento, introduzindo o seu código.

As leituras de viscosidade são feitas para várias velocidades de rotação, com a temperatura controlada a  $25\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ .

Devem-se efectuar ensaios em triplicado iniciando-se as determinações com as velocidades de rotação mais baixas.

Entre cada determinação deve deixar-se o fluido equilibrar, esperando 45 segundos, a rodar à velocidade pretendida até fazer a leitura.

É importante que se cumpra sempre o mesmo procedimento, uma vez que a taxa de deformação vai afectar a viscosidade do fluido.

- O tempo de estabilização utilizado é de 45 segundos
- O tempo restante para o minuto, 15 segundos, é usado para fazer as leituras e passar à velocidade seguinte.

A consistência é determinada após ajuste dos dados da viscosidade aparente (Pa.s) e da taxa de deformação à lei de Newton (para fluidos Newtonianos).

A taxa de deformação ( $\text{s}^{-1}$ ) é calculada através da equação 9.

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{60} \times 2\pi \times \left( \frac{2R_c^2}{R_c^2 - R_b^2} \right)$$

$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação ( $\text{s}^{-1}$ )	
V	Velocidade de rotação em rpm	
Rc	Raio interno do adaptador de pequenas amostras (diâmetro = 1,9 cm)	Equação [9]
Rb	Raio do spindle	

Os valores da viscosidade retirados do viscosímetro de Brookfield são expressos em cP, assim para determinar a viscosidade aparente recorreremos à equação 10.

$$\eta_a = \frac{\eta}{1000}$$

$\eta_a$	$\eta$	Pa.s	
	$\eta$	cP	Equação [10]

**Procedimento experimental:**

Determine a viscosidade do vinho através do viscosímetro capilar e do mel através do viscosímetro de Brookfield.

### **Protocolo 3: Determinação da viscosidade – fluidos não Newtonianos**

O escoamento de fluidos não Newtonianos é geralmente descrito pela lei da potência, expressa em função da tensão [equação 1] ou da viscosidade aparente [equação 2].

$\tau = k \times \dot{\gamma}^n$	$\tau$	Tensão (Pa)	Equação [1]
	k	Consistência (Pa.s <sup>n</sup> )	
	$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação (s <sup>-1</sup> )	
$\eta_a = k \times \dot{\gamma}^{n-1}$	n	Índice de escoamento	Equação [2]
	$\eta_a$	Viscosidade aparente (Pa.s)	

$n > 1$  a viscosidade aumenta com a taxa de deformação e estamos perante um fluido reoespessante, esta situação verifica-se muitas vezes ou para taxas de deformação muito baixas, ou, nalguns casos, para taxas de deformação muito altas.

$n < 1$  a viscosidade diminui com a taxa de deformação e estamos perante um fluido reofluidificante, sendo este último caso o mais encontrado nos fluidos alimentares.

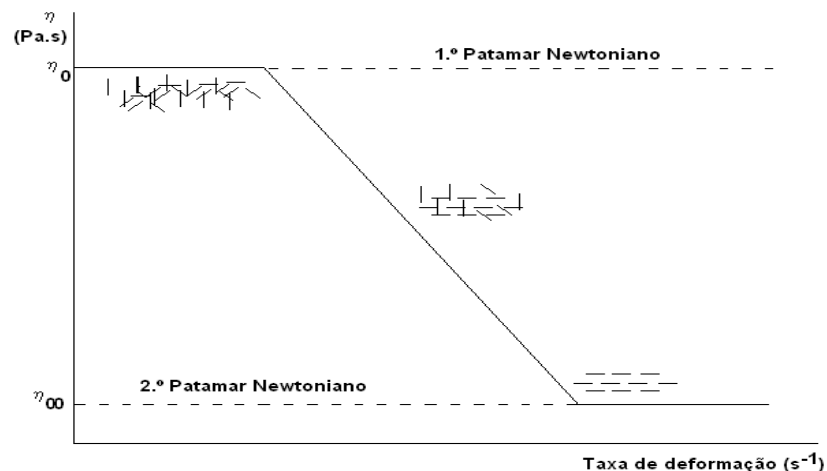


Figura 1 - Variação da viscosidade de uma solução de um polímero de moléculas em bastonete alongado. Alinhamento sucessivo dos bastonetes segundo as linhas de corrente.

#### **Viscosímetro de Brookfield para fluidos não Newtonianos:**

##### **Lei da potência:**

$$\eta_a = k \times \dot{\gamma}^{n-1}$$

Logaritmizando:

$$\log \eta_a = \log k + (n - 1) \log \dot{\gamma}$$

(Equação [3])

Equação da recta:  $y = dx + b$

Antilog  $b = k$  Consistência

$n = d + 1$  Índice de escoamento

#### **Procedimento experimental:**

Determine a viscosidade da polpa de tomate através do viscosímetro de Brookfield (cálculo do índice de escoamento e da consistência) e pelo método empírico consistómetro de Bostwick (distância que escorre durante 30 segundos – cm).

### **Protocolo 4: Determinação das características viscoelásticas – Teste de relaxação da tensão**

Os testes de relaxação da tensão são testes de compressão utilizados para interpretar o comportamento viscoelástico dos materiais. São testes simples de efectuar mas que representam alguma dificuldade na sua interpretação de forma objectiva ou matemática.

Permitem comparações qualitativas de curvas obtidas nas mesmas condições, a sua interpretação matemática tem certas limitações pois os alimentos não são homogéneos nem isotrópicos e o intervalo de viscoelasticidade linear é geralmente muito curto.

Quando as propriedades viscoelásticas são relacionadas com a textura, devem ser aplicadas deformações muito maiores do que o valor limite de viscoelasticidade linear.

Muitos autores têm tentado ajustar modelos matemáticos aos resultados experimentais. O modelo mais usado em estudos de relaxação de geles é a linearização de Peleg e Norman (1983) (Gamero *et al.*, 1993; Winwood *et al.*, 1990).

$$Y(t) = \frac{F_0 - F_t}{F_0}$$

Equação [1]

$F_0$  Força no tempo inicial (faz-se corresponder a origem do tempo à força máxima)  
 $F_t$  Força registada no tempo t

$$\frac{t}{Y_t} = k_1 + k_2 t$$

Equação [2]

$\frac{1}{k_1}$  Relacionado com o decaimento inicial da tensão. Quanto maior o decaimento maior a componente **viscosa** do material  
 $\frac{1}{k_2}$  Relacionado com a tensão que ainda não relaxou para elevado tempo de compressão, pelo que  $1 - 1/k_2$  está directamente relacionado com a componente **elástica** do material

Uma abordagem mais simples do teste de relaxação é o cálculo da percentagem de relaxação (equação 3):

$$Y_t = 100 \times \frac{F_0 - F_{eq}}{F_{eq}}$$

Equação [3]

$F_{eq}$  Força de equilíbrio, a partir da qual não há variação ao longo do tempo de compressão. O tempo necessário para atingir a força de equilíbrio depende do tipo de material

Por outro lado  $(100 - Y_t)$  pode ser considerado como um índice de elasticidade, i.e., percentagem de elasticidade do gel.

#### **Procedimento experimental:**

No texturómetro TA-XT2 vai ser estudada a viscoelasticidade de delícias do mar

“Relaxation test”

Força constante ao longo do tempo (9,8 N e 19,6 N, durante 250 s)

#### **Bibliografia:**

- Gamero, M., Fiszman, S. e Drán, L. (1993). Stress relation of fruit gels. Evaluatin of models and effects of composition. *Journal of Food Science*. 58 (5): 1125 – 1134
- Winwood, R., Jones, S. e Mitchell, J. (1990). Springiness and viscoelasticity of gels. *Gums and stabilizers for the food industry* 3. Eds G.O. Phillips, D.J. Wedlock & P.A. Williams. IRL Press, Oxford, pp 611 – 619.

## **Protocolo 5: Viscoelasticidade – Comportamento ao longo do tempo**

Os corpos viscoelásticos expressam simultaneamente características viscosas e elásticas – comportamento intermédio entre o de um fluido e de um sólido

### **Testes Estáticos**

- Teste de Fluência – tensão imposta constante.
- Teste de Relaxação da Tensão – deformação mantida constante.

### **Testes Dinâmicos**

Aplica-se uma tensão ou uma deformação que varia sinusoidalmente com o tempo, a uma frequência, e regista-se a deformação ou a tensão resultante:

- A elasticidade domina para baixos tempos de observação (altas frequências)
- A viscosidade aumenta para tempos longos (baixas frequências)

Estes testes só são válidos para baixas tensões/ deformações (não destrutivos)

Tornaram-se procedimentos reológicos de rotina  $\Leftrightarrow$  avanço tecnológico de software informático e *design* de equipamento.

$G'$  – Módulo elástico ou de armazenamento (mede a energia armazenada)

$G''$  – Módulo viscoso ou de dissipação (mede a energia dissipada)

$\delta$  – Ângulo de dissipação ou diferença de fase

Campo periódico de deformações:  $\gamma = \gamma_0 \text{sen}(\omega t)$

Campo periódico de tensões:  $\tau = \tau_0 \text{sen}(\omega t + \delta)$

Desfasado do primeiro de uma quantidade:  $\delta$  = diferença de fase

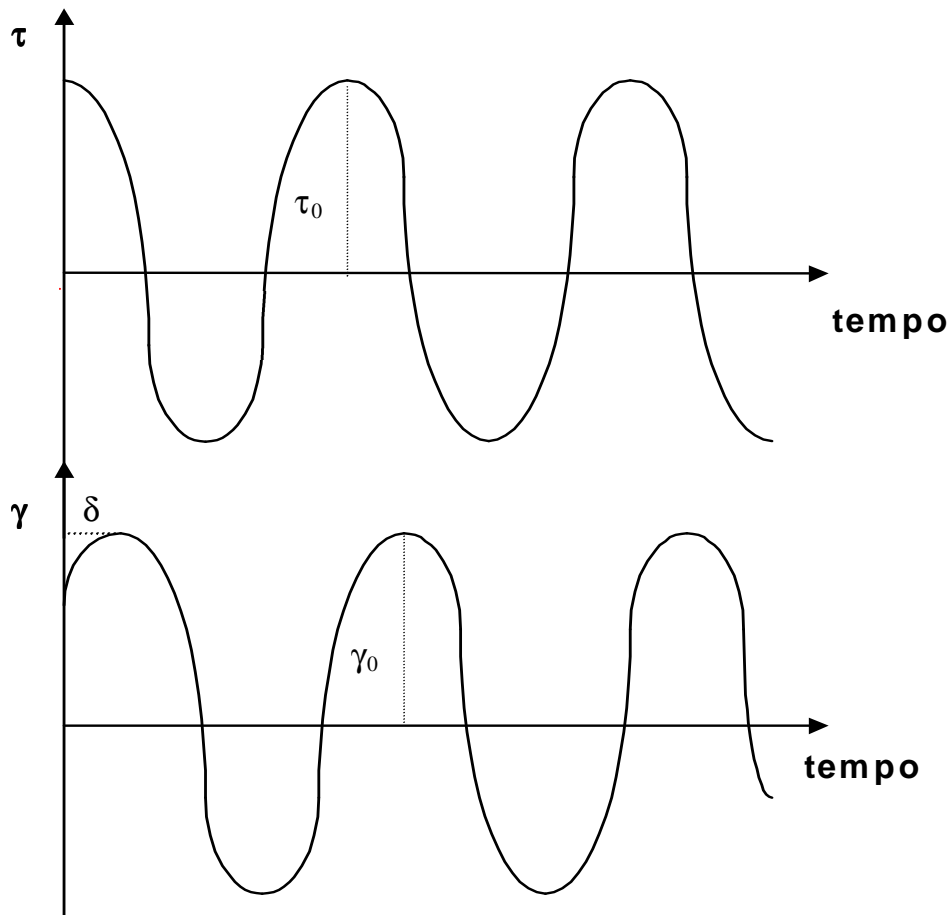
Relação entre  $\tau$  e  $\gamma$ :

$$\tau = (\tau_0 \cos\delta \text{sen}\omega t) + (\tau_0 \text{sen}\delta \cos\omega t)$$

$$\tau = \gamma_0 (G' \text{sen}\omega t + G'' \cos\omega t)$$

Porque,

$$G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos\delta \qquad G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \text{sen}\delta \qquad \frac{G''}{G'} = \text{tg}\delta$$



$\delta = 0$  Tensão em fase com a deformação

Comportamento elástico perfeito (resposta imediata, deformação proporcional à tensão, a resposta não depende do tempo)

$\delta = \pi/2$  Tensão e deformação desfasadas de  $90^\circ$

Comportamento líquido viscoso (à medida que a tensão diminui a deformação continua a aumentar, só quando a tensão se anula é que a deformação atinge o seu máximo)

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt}$$

Quando  $\tau = 0 \rightarrow \frac{d\gamma}{dt} = 0$   
 Quando  $\tau = \tau_0 \rightarrow \frac{d\gamma}{dt}$  máximo

$\gamma$  tem máximo ou mínimo

Ponto de inflexão  $\gamma$

$$0 < \delta < \frac{\pi}{2}$$

Material viscoelástico

Teste de varrimento de tensões  $\rightarrow$  Determinação da zona viscoelástica linear

Teste de varrimento de frequências  $\rightarrow$  Espectro mecânico

Teste de varrimento de temperatura

Teste de varrimento de tempo (géis)

### Determinação da zona viscoelástica linear

A tensão a aplicar deve ser tal que o material responda às solicitações sem haver destruição da sua estrutura interna, para podermos ter ideia do tipo de ligações envolvidas na estrutura tridimensional

Determinar a gama de tensões onde as funções viscoelásticas ( $G'$  e  $G''$ ) são independentes da tensão aplicada

Teste de varrimento de tensões – a tensão aplicada varia ao longo do tempo, a um valor de frequência fixo, e medem-se os módulos viscoelásticos

### **Espectro mecânico**

Para obter o espectro mecânico faz-se um teste de varrimento de frequências = registam-se as variações de  $G'$  e  $G''$  em função da frequência, a uma tensão constante.

A tensão a utilizar é determinada com base do teste anterior – teste de varrimento de tensões.

Para tensões muito pequenas as deformações podem ser reversíveis

Estes testes permitem avaliar a microestrutura e prever a estabilidade do sistema

### **Equipamento**

- **Reómetro**
- **Compressor**
- **Banho de controlo de temperatura ou sistema *peltier***
- **Sistemas sensores**
- **Software** (realização de medidas e tratamento de resultados)

#### ***Sistema de cone e prato***

Muito fáceis de limpar, requerem quantidades pequenas de amostra (0,5-5ml).

Este sistema é utilizado para gamas de viscosidades médias - altas e apresenta uma precisão da ordem dos 3%.

O ponto de contacto entre o cone e o prato deverá ser o menor possível ( $\approx 0$ )  $\Rightarrow$  utilização limitada em sistemas com partículas em suspensão.

Podem utilizar-se velocidades de deformação elevadas ( $10^4$  s<sup>-1</sup>), especialmente para ângulos de cone baixos.

Sistema melhor adaptado a fluidos não-Newtonianos; o ângulo do cone ( $\leq 4^\circ$ ) compensa a variação da velocidade de deformação ao longo do cone.

#### ***Sistema de pratos paralelos***

Usa-se no estudo de borrachas, polímeros fundidos e materiais muito viscosos em geral, devido à simplicidade de utilização.

No entanto, a deformação não é homogénea, sendo o fluido sujeito a deformação máxima junto à periferia e nula no centro.

Usualmente, estes sensores apresentam superfícies rugosas de forma a minimizar efeitos de “escorregamento” da amostra para altas velocidades de deformação.

#### ***Sistema de cilindros concêntricos***

Promove-se o escoamento da amostra entre 2 cilindros concêntricos com o cilindro interior rodando a uma velocidade angular  $w$ .

Factor de qualidade das medidas - relação entre os raios ( $\delta = R_e/R_i$ ) – “gap”;

Situação ideal,  $\delta = 1 \Rightarrow R_e = R_i$ . Geralmente considera-se  $1,00 < \delta < 1,10$  – diferenças de 10% entre os dois raios. Para diferenças superiores, o gradiente de velocidades de deformação não é constante ao longo de todo o recipiente

Podem ser utilizados em sistemas com partículas em suspensão ( $\phi < 1/3 d$ )

São necessárias quantidades apreciáveis de amostra (10-50 ml)

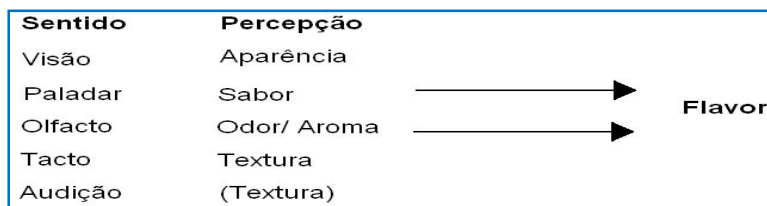
Precisão das determinações da ordem dos 1-2%.

**Procedimento experimental:**

No reómetro efectuar um teste de varrimento de tensão e um espectro mecânico para um iogurte mantidos à temperatura de refrigeração e outro mantido a cerca de 25 °C.

## **Protocolo 6: Análise de perfil da textura – *Texture Profile Analysis* – TPA**

A análise sensorial é um processo complexo que envolve os cinco sentidos:



**Textura** é uma característica decorrente da nossa interacção com os alimentos, com a sua estrutura e com o seu comportamento quando manuseados.

Há um conjunto de propriedades físicas percebidas sensorialmente (vêm-se, ouvem-se, sentem-se) que são uma consequência da estrutura interna do material que, por sua vez, é determinada pelas interacções moleculares dos seus constituintes.

Estas características podem ser determinadas por um método instrumental – **Análise de Perfil de Textura – *Texture Profile Analysis* (TPA)**. Este teste imita as condições nas quais os alimentos são submetidos durante o processo de mastigação, envolve duas penetrações na amostra, com uma pausa entre elas, simulando a acção de duas dentadas no alimento e é por isso que também se designa por **teste das duas dentadas (*two bite*)**.

Os parâmetros avaliados no TPA são dureza, elasticidade, adesividade, coesividade e fracturabilidade.

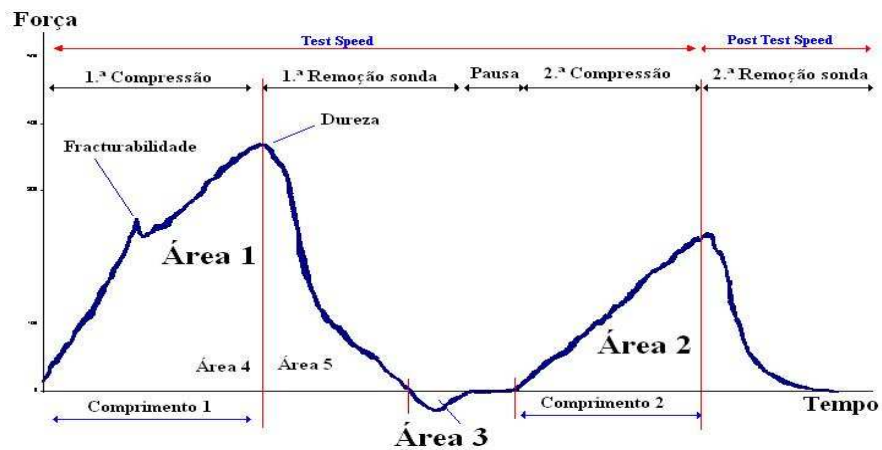
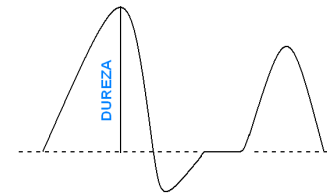
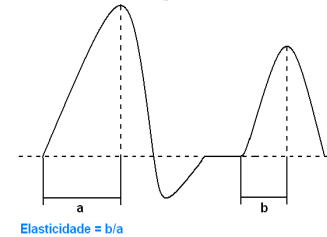


Figura 1 - Exemplo de um texturograma de um teste de perfil de textura.

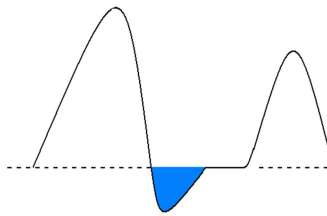
**Dureza** - Força necessária para comprimir os alimentos entre os molares. Força máxima registada no texturómetro (N).



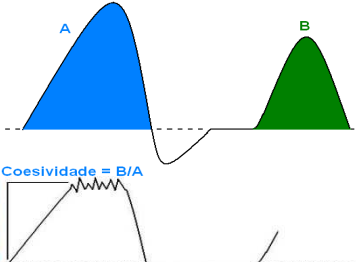
**Elasticidade** - A extensão necessária para que o alimento volte ao tamanho original quando a força for removida. Relacionada com a percentagem de recuperação do material.



**Adesividade** - O trabalho necessário para puxar o alimento a partir da superfície. É uma medida de esforço do material para que a sonda seja retirada do alimento.



**Coesividade** - As forças exercidas pelas ligações internas do alimento.



**Fracturabilidade** - Força à qual o material fractura. Alimentos muito friáveis nunca apresentam adesividade.

**Procedimento experimental:**

No texturómetro TA-XT2 faça um teste TPA para um queijo de pasta mole e calcule os parâmetros convenientes.

## **Protocolo 7: O estado vítreo e a sua relação com a textura**

Alimentos - sistemas complexos compostos maioritariamente por polímeros naturais, como proteínas e/ ou polissacáridos, gorduras, açúcares e água

Remoção da água:

Estado amorfo

Parcialmente cristalino

Completamente cristalino (açúcar e sal)

As propriedades termodinâmicas e as transições de fases entre estes estados são extremamente importantes na desidratação, textura e estabilização dos alimentos.

O arrefecimento de uma suspensão de polímero provoca a diminuição da mobilidade das cadeias poliméricas, existindo uma temperatura característica para cada material abaixo da qual a mobilidade molecular é muito restrita, designada por temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do polímero.

Se a temperatura for inferior à temperatura de transição vítrea o polímero encontra-se no estado amorfo vítreo (*glassy state*).

Antes de se atingir o estado vítreo, o polímero passa por um estado amorfo pastoso (*rubbery state*) onde ainda existem alguns movimentos moleculares. O mesmo se passa com os alimentos mas as transições são múltiplas dada a complexidade de composição.

O conceito de estado vítreo corresponde ao de um material com uma estrutura molecular desordenada, caracterizado por uma muito baixa mobilidade molecular. A viscosidade do material no estado vítreo é extremamente elevada ( $\approx 10^4$  Pa.s)

No sólido cristalino também há imobilização molecular, mas as moléculas estão dispostas de uma forma ordenada, numa organização geométrica característica do cristal.

O fenómeno de transição vítrea é acompanhado de uma variação brusca de várias propriedades físicas:

Capacidade calorífica

Índice de refração

Viscosidade

Textura

Aumento estabilidade

A água e outras substâncias de baixo peso molecular e grupos funcionais OH (e.g. glicerol, sorbitol, glucose, frutose, ácido acético) actuam como agentes plastificantes.

Um **plastificante** pode ser definido como uma substância de baixo peso molecular que aumenta a mobilidade das moléculas, baixando assim a  $T_g$  e aumentando a deformabilidade dos produtos onde está presente.

A forma mais eficaz de conseguir que um produto alimentar atinja o estado vítreo é retirar a água e baixar a sua temperatura.

Quanto menor for o teor de humidade do produto mais elevada será a sua temperatura de transição vítrea.

Se os alimentos se encontrarem no estado vítreo a sua preservação é garantida ao longo do tempo sem que ocorram reacções de alteração química ou biológica, uma vez as suas moléculas estão imobilizadas.

Como exemplos de alimentos que se encontram no estado vítreo é possível referir:

Produtos com um teor de humidade bastante reduzido, como produtos liofilizados, bolachas, batatas fritas, “snacks” e rebuçados, à temperatura ambiente

Alimentos com elevado teor de humidade quando congelados.

Os alimentos no estado vítreo possuem uma característica muito importante que se designa por **friabilidade**.

A friabilidade, isto é, o carácter quebradiço do alimento, é caracterizada por um parâmetro designado *brittiness* (**b**), que corresponde à deformação na rotura.

Quanto menor o valor de **b** mais quebradiço é o alimento.

**Procedimento experimental:**

No texturómetro TA-XT2 faça o teste que ache mais conveniente para determinar o *brittiness* (**b**) para duas bolachas maria, uma conservada na embalagem origem e outra mantida ao ar e à temperatura ambiente.

### **Protocolo 8: Exercícios – Dimensionamento de fluidos complexos**

**Problema 1:** Considere os seguintes resultados de determinação de viscosidade aparente de iogurte líquido a 75 °C, obtidos experimentalmente num viscosímetro de Brookfield, usando o *spindle* S31. Para obter a taxa de deformação no sistema internacional ( $s^{-1}$ ), multiplicar a taxa de deformação em rpm por 0,34.

<b>V (rpm)</b>	<b><math>\eta</math> (cP)</b>
0,5	5040
1	2970
2	2055
2,5	1968
4	1995
5	1680
10	1050
20	666
50	371
100	245

- Calcular a  $\dot{\gamma}$  ( $s^{-1}$ ),  $\log \dot{\gamma}$ ,  $\eta_{ap}$  (Pa.s),  $\log \eta_{ap}$  e a  $\tau$  (Pa).
- Elabore o gráfico  $\tau$  (Pa) vs  $\dot{\gamma}$  ( $s^{-1}$ )
- Elabore o gráfico  $\eta_{ap}$  (Pa.s) vs  $\dot{\gamma}$  ( $s^{-1}$ )
- Elabore o gráfico  $\log \eta_{ap}$  vs  $\log \dot{\gamma}$
- Exclua os pontos que não estão situados na tendência de uma recta e elabore a regressão linear
- Descreva o comportamento de escoamento deste iogurte através da lei da potência e caracterize-o.

**Problema 2:** Considere os seguintes resultados de determinação de viscosidade aparente de azeite líquido, obtidos experimentalmente num viscosímetro de Brookfield, usando o *spindle* S18. Para obter a taxa de deformação no sistema internacional ( $s^{-1}$ ), multiplicar a taxa de deformação em rpm por 1,32.

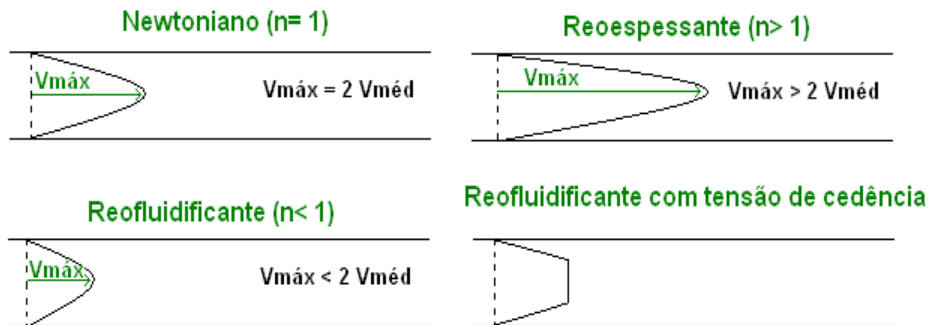
<b>V (rpm)</b>	<b><math>\eta</math> (cP)</b>
4	80,2
5	81,6
10	80,7
20	81,3

- Calcular a  $\dot{\gamma}$  ( $s^{-1}$ ),  $\log \dot{\gamma}$ ,  $\eta_{ap}$  (Pa.s),  $\log \eta_{ap}$  e a  $\tau$  (Pa).
- Elabore o gráfico  $\tau$  (Pa) vs  $\dot{\gamma}$  ( $s^{-1}$ )
- Elabore o gráfico  $\eta_{ap}$  (Pa.s) vs  $\dot{\gamma}$  ( $s^{-1}$ )
- Elabore o gráfico  $\log \eta_{ap}$  vs  $\log \dot{\gamma}$
- Exclua os pontos que não estão situados na tendência de uma recta e elabore a regressão linear

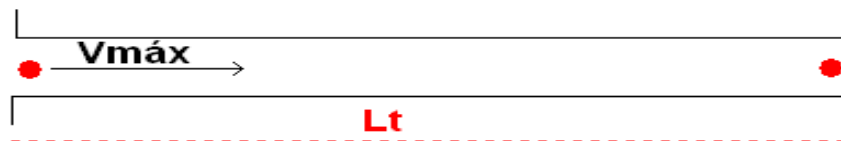
f) Descreva o comportamento de escoamento deste azeite através da lei da potência e caracterize-o.

Fluidos Newtonianos	Exemplos: Água, óleo	Lei de Newton: $\tau = \eta \times \dot{\gamma}$	A viscosidade define o comportamento do fluido
Fluidos não newtonianos	Exemplos: iogurte, ketchup	Lei da potência: $\eta_a = k \times \dot{\gamma}^{n-1}$	É necessário a consistência (k) e o índice de escoamento (n) para definir o comportamento do fluido

**Perfil de velocidade no escoamento em tubo sob pressão:**



**Tubo holding:**



Pasteurização – binómio tempo/ temperatura

Permutador – temperatura

Holding – tempo, considerando a velocidade máxima há garantia de sucesso, considerando velocidade média não há garantia de sucesso do tratamento térmico

**Marcha de cálculo:**

Objectivo: Calcular o comprimento do tubo Holding ( $L_t$ )

Fluido Newtoniano ( $n = 1$ )

1.º  $C_v \rightarrow V_{m\acute{e}d}$

2.º  $V_{m\acute{a}x} = 2 \times V_{m\acute{e}d}$

3.º  $L_t = V_{m\acute{a}x} \times \text{tempo de pasteurização}$

Fluido Newtoniano ( $n \neq 1$ )

1.º  $C_v \rightarrow V_{m\acute{e}d}$

2.º *Holding efficiency tube:*  $HE = \frac{n+1}{3n+1} = \frac{V_{m\acute{e}d}}{V_{m\acute{a}x}}$

3.º  $L_t = V_{m\acute{a}x} \times \text{tempo de pasteurização}$

**Problema 3:** Pretende-se dimensionar um *holding tube* para pasteurizar o iogurte estudado no problema 1.

O diâmetro do tubo é 5 polegadas

O binómio de pasteurização é 75 °C/ 15 s

O caudal do pasteurizador é 2,5 l/ s.

Índice de escoamento (n) = 0,45

Consistência (K) = 1,9 Pa.s<sup>0,45</sup>

Determine o comprimento do tubo.

**Problema 4:** Um determinado puré de fruta é pasteurizado num *holding tube* de 4 polegadas de diâmetro. O caudal debitado pelo pasteurizador é de 1 l/ s. O binómio de pasteurização é 70 °C/ 12 s. A esta temperatura estudaram-se os parâmetros de escoamento do puré num viscosímetro de Brookfield, obtendo-se a seguinte lei que caracteriza o escoamento:

$$\tau = 3,18\dot{\gamma}^{0,4} \text{ (Pa)}$$

- a) Determine o comprimento do *holding tube* considerando:
  1. Que o escoamento do fluido é Newtoniano
  2. A natureza real do escoamento (reofluidificância)
- b) Qual o erro, em %, de tempo de pasteurização, quando se dimensionou o *holding tube* partindo do princípio que o fluido é Newtoniano. Indique se o tratamento é excessivo ou suficiente.

**Problema 5:** O tratamento térmico final de um concentrado de tomate é efectuado durante 20 s a uma temperatura de 82,2 °C. Usando um *holding tube* com 3 polegadas de diâmetro. O caudal é 2 l/ s. Calcule o comprimento do tubo *holding* para as seguintes percentagens de sólidos (° Brix):

- a) 12,8      n = 0,345
- b) 16        n = 0,380
- c) 25        n = 0,445

### **Bombas – Escoamento em tubos sob pressão**

Variáveis:

Tubo: Diâmetro (D)

Fluído: Velocidade (V), densidade ( $\rho$ ) e viscosidade ( $\eta$ )

**N.º de Reynolds:**

Fluídos Newtonianos

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta}$$

Fluídos não Newtonianos

$$Re' = \frac{\rho \cdot v^{2-n} \cdot D^n}{8^{n-1} \cdot k} \left( \frac{4n}{1+3n} \right)^n$$

Diagrama de Moody

Re < 2300 – Regime laminar  
Re > 3000 – Regime turbulento

A bomba fornece energia para vencer:

O atrito interno:  $\Delta P / \rho$  (J/ Kg)

A altura:  $g \cdot \Delta h$  (J/ Kg)

O espaço:  $\Delta v^2 / \alpha$  (J/ Kg)  
( $\alpha$  – factor de correcção para energia cinética)

Perdas de energia por atrito:  $E_f$  (J/ Kg)

A **energia por unidade de massa** é dada pelo Teorema de Bernoulli:

$$\frac{E}{m} = \frac{\Delta v^2}{\alpha} + g \cdot \Delta h + \frac{\Delta P}{\rho} + E_f \text{ [J/Kg]}$$

A **potência da bomba** em watt ( $W = J \cdot s^{-1}$ ) calcula-se da seguinte forma:

$$P = \frac{E}{m} \times C_m \text{ [W ou J/s]}$$

$E/m$  – energia por unidade de massa

$C_m$  – Caudal mássico

Se dividirmos os membros da equação de Bernoulli por **g** (aceleração da gravidade), as unidades de energia por unidade de massa, são convertidas a **m**.

$$\frac{E}{m \cdot g} = \frac{\Delta v^2}{\alpha \cdot g} + \Delta z + \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} + E_f \quad \text{[m/ Kg]}$$

Cinémática                  Estática                  Piezométrica

**$\alpha$  é a correcção para a energia cinética:**

Newtonianos

Não Newtonianos

Regime laminar:  $\alpha = 1$

$$\text{Regime laminar: } \alpha = \frac{(4n+2)(5n+3)}{3(3n+1)^2}$$

Regime turbulento:  $\alpha = 2$

Regime turbulento:  $\alpha = 2$

A equação de Bernoulli pode ser escrita da seguinte forma:

$$gZ_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{\alpha} + W = gZ_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{\alpha} + Ef$$

**Perdas de energia devidas ao atrito:**

Ao longo do tubo

Válvulas

Contrações ou alargamento súbitos

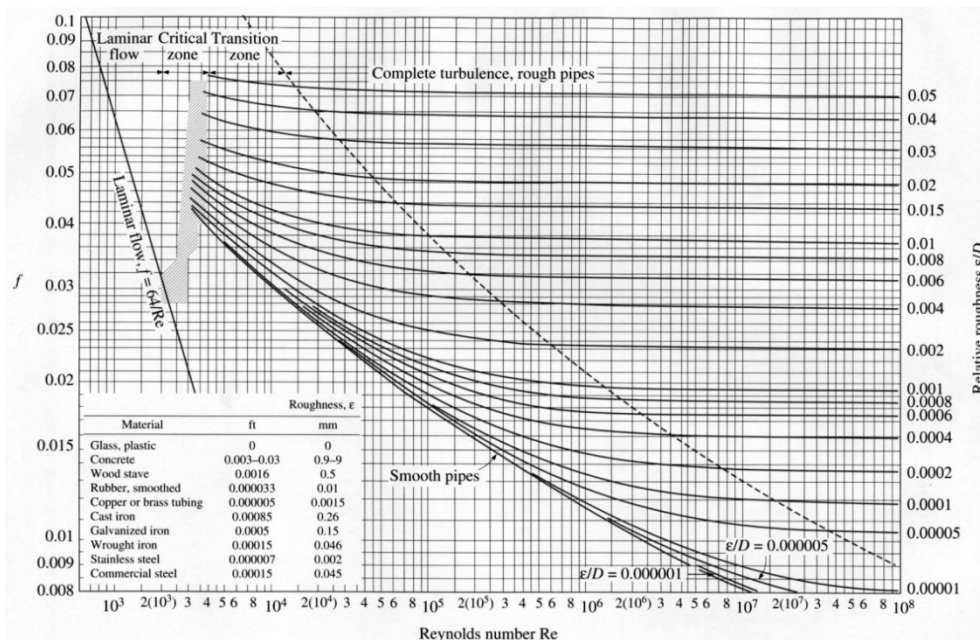
$$Ef = \frac{2fv^2L}{D} + \sum Kf \frac{v^2}{2} + \frac{\Delta P}{\rho} \quad [J/ Kg]$$

Em linha                  Acidentes                  Outros

**Para o cálculo de f:**

Regime laminar:  $f = \frac{16}{Re}$

Regime turbulento: Consultar o diagrama de Moody



**Potência da bomba:**

$$P = W \times m \text{ [W]}$$

W – Trabalho [J/ Kg]

m – caudal mássico [Kg/ s]

**Problema 6:** É necessário fazer a bombagem de um fluido alimentar com uma consistência, à temperatura ambiente, de  $0,17 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{0,8}$ , através de tubo de 25,4 mm de diâmetro e que debita um caudal de  $0,0015 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Calcule:

- A velocidade média do fluido.
- O n.º de Reynolds.
- A quebra de pressão ao longo do tubo de 30 m (sem inclinação).
- A energia necessária para a bombagem considerando uma diferença de cotas de 3 m.

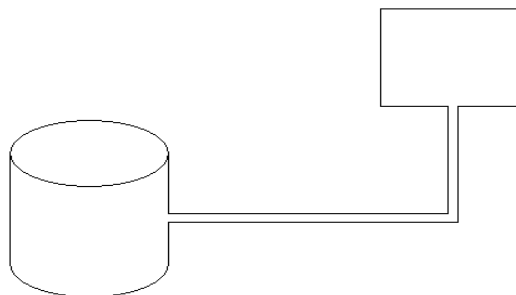
**Considere:** Densidade do fluido  $1100 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ; aceleração da gravidade  $9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ; tubo de inox liso.

**Problema 7:** Pretende-se bombear polpa liquefeita de abacate com uma densidade de  $950 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (viscosidade aparente de  $2,9 \pm 0,06 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  a  $10 \text{ s}^{-1}$  e  $1,7 \pm 0,04 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  a  $20 \text{ s}^{-1}$ ) através de um tubo de aço inox com 4 cm de diâmetro desde o liquidificador até ao tanque de mistura. Este encontra-se situado a 5 m de altura e a 10 m de distância do liquidificador. O caudal requerido é de  $0,003 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  e o tubo tem um cotovelo de  $90^\circ$ . Calcule:

- A de Reynolds.
- O factor de atrito f.
- As energias potencial, cinética e de atrito por unidade de massa.
- A energia total e a potência da bomba.

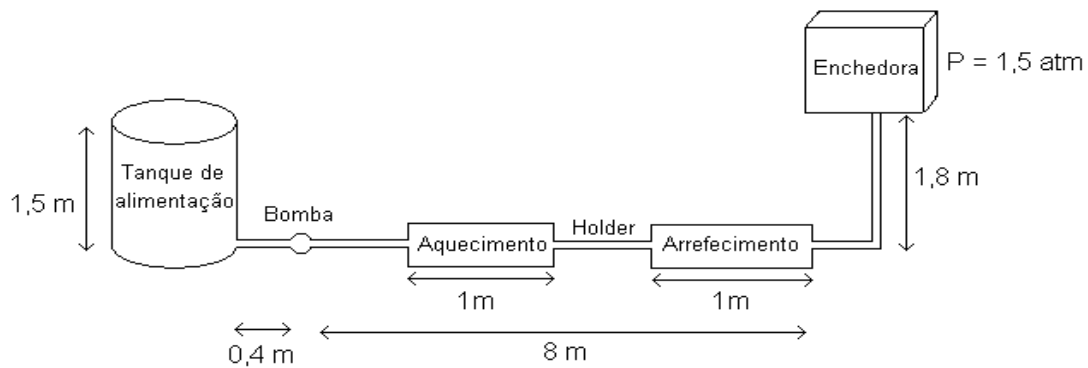
**Considere:** Aceleração da gravidade  $9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  e o Kf para o cotovelo de 0,9.

Considere ainda o seguinte diagrama:



**Problema 8:** Considere o esquema representado, usado para pasteurizar uma sobremesa de puré de maçã para alimentos infantis, com enchimento asséptico, à temperatura ambiente, sob pressão ligeira (diâmetro do tubo = 4 cm).

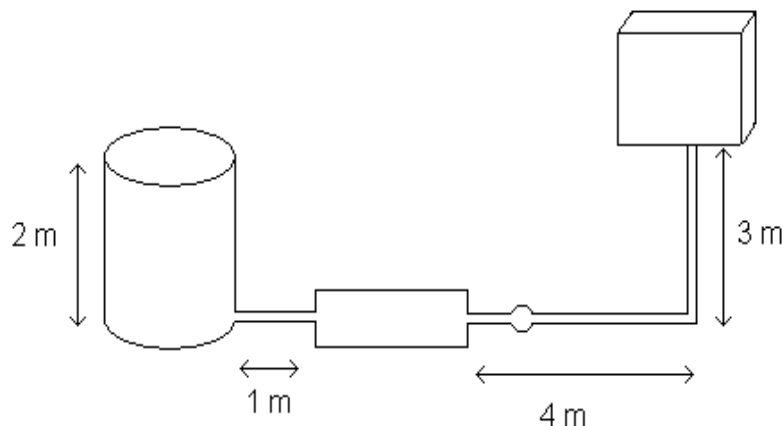
O nível do tanque de alimentação é mantido sensivelmente constante e o débito de enchimento regulado para  $500 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ . A temperatura de pasteurização é de  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 5 s.



Calcular a distância (Lt) que deverá existir entre o primeiro permutador e o segundo, sabendo que a massa volúmica, a 80 °C, é de  $1,15 \text{ g.cm}^{-3}$  e a consistência, a 80 °C, é de  $2,6 \text{ dines.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{0,45}$ .

Calcular a potência que terá de ser fornecida pela bomba, sabendo que à temperatura ambiente (20 °C) a massa volúmica do fluido é de  $1,20 \text{ g.cm}^{-3}$ , a consistência  $5,0 \text{ dines.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{0,645}$ . O coeficiente de atrito no cotovelo é de 0,45 e a variação de pressão em cada permutador é de 50 kPa.

**Problema 9:**



Calcule a perda de carga no permutador no circuito representado:

Nível de depósito constante

Caudal mássico do circuito é de  $600 \text{ g.s}^{-1}$

O binómio de pasteurização é de 80 °C/ 10 s e o arrefecimento à temperatura ambiente é feito no mesmo módulo

A bomba de elevação tem potência de 80 W

A massa volúmica do fluido é de  $1,15 \text{ g.cm}^{-3}$ , a 20 °C, e de  $1,10 \text{ g.cm}^{-3}$ , a 80 °C, e as consistências respectivamente  $12 \text{ dines.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{0,45}$  e de  $8 \text{ dines.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{0,45}$

O coeficiente de atrito nas perdas de carga singulares é de 0,45 para o cotovelo e de 0,90 para a válvula da enchedora

A pressão da enchedora é  $51 \times 10^3 \text{ Pa}$  acima da pressão atmosférica (quer dizer pressão relativa)

O diâmetro do tubo é de 4 cm.

**Problema 10:** É necessário bombear iogurte líquido, a 4 °C, dum tanque para uma enchedora que se encontra a 12 m de altura. O caudal é de 0,004 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

Características das instalações:

- Tubo de aço inox com 10 cm de diâmetro, 40 m de comprimento, com um cotovelo de 90 ° ( $K_f = 0,90$ );
  - Tanque de alimentação está à pressão atmosférica. Enchedora com uma pressão de 130 KPa;
  - No laboratório foram determinadas as seguintes propriedades físicas do iogurte:  $\rho = 1030 \text{ Kg.m}^{-3}$ ; viscosidade aparente de 2,50 Pa.s a 0,85 s<sup>-1</sup> e 0,75 Pa.s a 6,8 s<sup>-1</sup>.
  - Considere a aceleração da gravidade igual a 9,8 m.s<sup>-2</sup>.
- a) Determine a equação de escoamento. Caracterize o fluido, sob o ponto de vista reológico .
- b) Calcule a potência da bomba.