



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ENGENHARIA QUÍMICA

LOQ4085– OPERAÇÕES UNITÁRIAS I

Profa. Lívia Chaguri
E-mail: Ichaguri@usp.br

Conteúdo

Agitação e Mistura

- **Introdução**
- **Agitação de líquidos**
- **Características e usos de impulsores**
- **Projeto de agitadores**
- **Cálculo da potência requerida para agitar fluidos Newtonianos**

Profa. Lívia Chaguri
E-mail: Ichaguri@usp.br

Conteúdo

Agitação e Mistura

- Cálculo da potência requerida para agitar fluidos não Newtonianos
- Fatores de correção nos cálculos de agitadores

Profa. Lívia Chaguri
E-mail: Ichaguri@usp.br

Conteúdo

Agitação e Mistura

- **Projeto por semelhança – ampliação escala**
 - **Semelhança geométrica**
 - **Semelhança dinâmica**
 - **Igualdade de potência por unidade de volume**
 - **Igualdade na velocidade periférica do agitador**
 - **Tempo de mistura**
 - **Igualdade na transferência de calor**

Profa. Lívia Chaguri
E-mail: Ichaguri@usp.br

Projeto de Agitadores

- Método: semelhança de sistemas;
- Baseia-se na análise dimensional para obter os critérios de mudança de escala.
- Etapas:
 - i) Seleção do tipo de impulsor;
 - ii) Cálculo das dimensões geométricas;
 - iii) Cálculo da frequência rotacional do impulsor;
 - iv) Cálculo da potência requerida.

Semelhança geométrica, cinemática e dinâmica entre modelo e protótipo para realizar a mudança de escala.

Semelhança geométrica é essencial para garantir a semelhança cinemática e dinâmica.

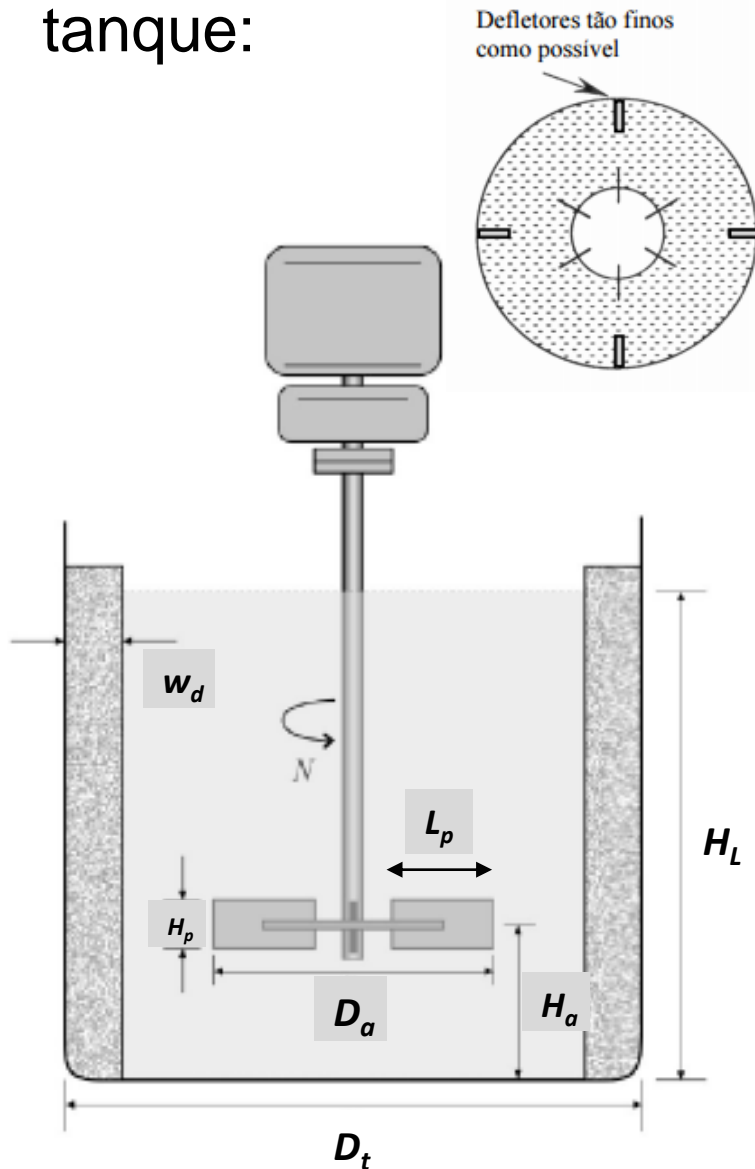
Projeto de Agitadores

- Semelhança geométrica existe se a relação entre as medidas nas duas escalas permanecem constantes.
- Semelhança dinâmica exige que a relação de velocidades e a relação de forças entre os vários pontos do sistema sejam iguais no modelo e protótipo.

Análise dimensional: fornece o número total de números adimensionais que relacionam as variáveis relevantes e que por sua vez influenciam a operação.

Projeto de Agitadores

➤ Variáveis envolvidas na agitação de um líquido em um tanque:



D_a – diâmetro do agitador;
 D_t – diâmetro do tanque;
 H_a – altura do agitador desde a base do tanque;
 H_L – altura líquido;
 w_d – largura dos defletores;
 H_p – altura das pás;
 ρ – densidade do líquido;
 μ – viscosidade do líquido;
 N – frequência rotacional do impulsor;
 g – aceleração da gravidade;
 P_0 – potência fornecida pelo motor.

$$P_0 = f(\rho, \mu, N, D_a, D_t, H_a, w_d, g) \quad (1)$$

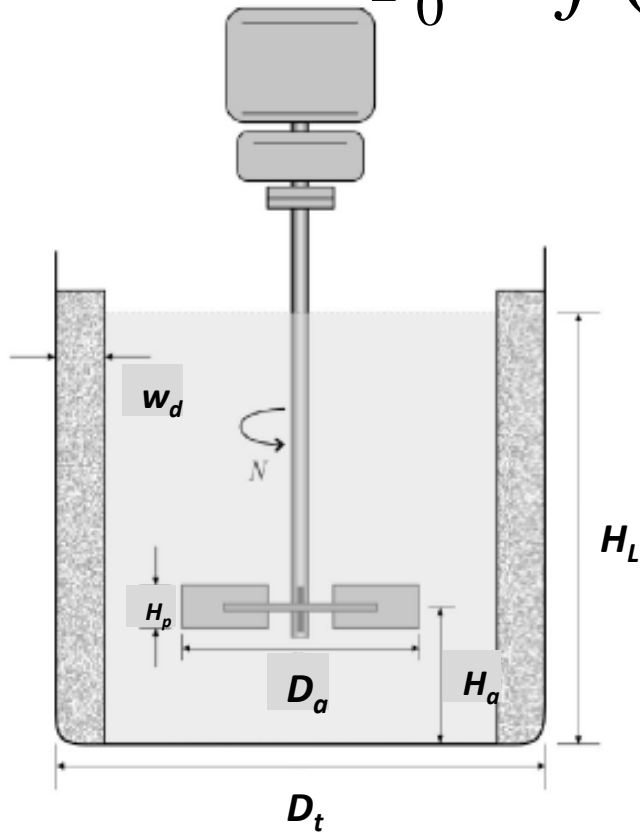


Fluido Newtoniano

Projeto de Agitadores

- Aplicando o método da análise dimensional, o número de variáveis pode ser reduzido ao números adimensionais de potência, de Reynolds e de Froude.

$$P_0 = f(\rho, \mu, N, D_a, D_t, H_a, w_d, g) \quad (1)$$



$$N_{P_0} = \frac{P_0}{N^3 D_a^5 \rho} \quad (2)$$

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu} \quad (3)$$

$$N_{Fr} = \frac{N^2 D_a^2}{g} \quad (4)$$

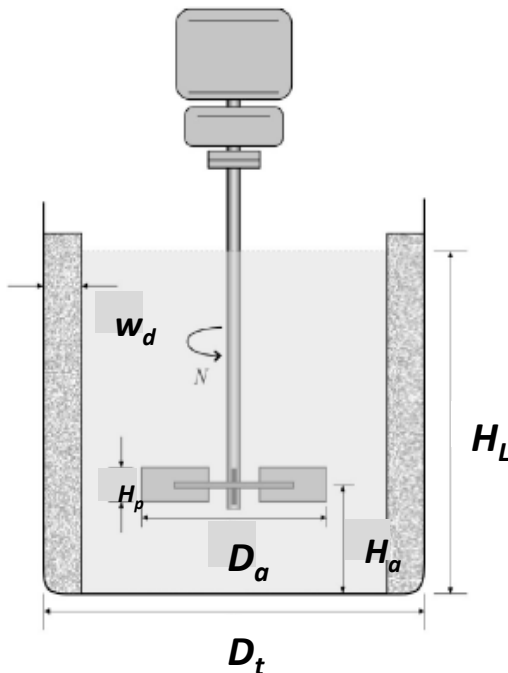
N_{P_0} , N_{Re} , N_{Fr} – número de potência, Reynolds, Froude (adimensionais)

Projeto de Agitadores

- Além dos números adimensionais, os números adimensionais geométricos (fatores de forma) são definidos:

$$\frac{D_t}{D_a}, \frac{H_a}{D_a}, \frac{H_L}{D_a} \text{ e } \frac{w_d}{D_a}$$

- Calculados dividindo as outras dimensões por D_a ;
- Diâmetro D_a do agitador é tomado como medida do tamanho do equipamento;
- D_a empregado como variável na análise dimensional.



$$P_0 = f(N_{Re}, N_{Fr}, \frac{D_t}{D_a}, \frac{H_a}{D_a}, \frac{H_L}{D_a}, \frac{w_d}{D_a}) \quad (5)$$

Número de Froude (N_{Fr}) deve ser considerado quando há formação de vórtice junto ao eixo. Fenômeno mais frequente para $N_{Re} > 300$ e para tanques sem defletores.

Cálculo da potência requerida: agitar fluidos newtonianos

- Quando definido previamente: tipo de agitador, velocidade angular e as dimensões geométricas – cálculo da potência é mais simples.
- Projeto é baseado no conhecimento da energia dissipada pelo agitador para essas condições.
- Implica na determinação do N_{P0} .

Fatores de forma padrão mais utilizados:

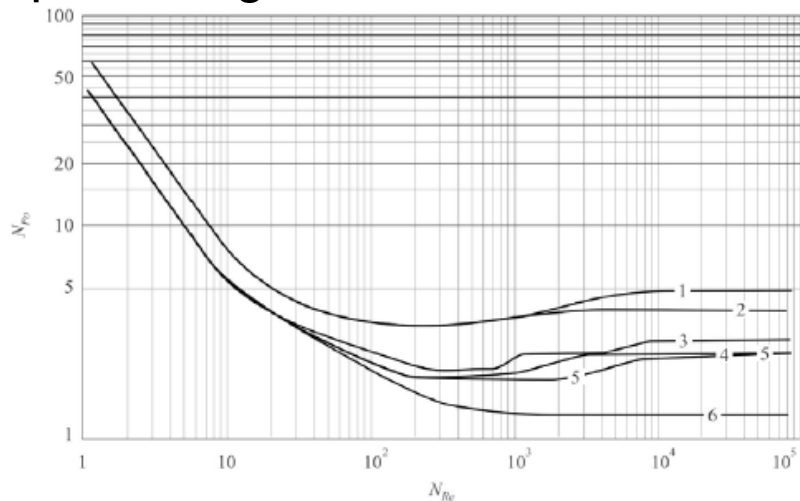
$$\frac{D_t}{D_a} = 3, \frac{H_a}{D_a} = 1, \frac{H_L}{D_a} = 3, \frac{w_d}{D_t} = 0,1$$

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}, \frac{H_a}{D_t} = \frac{1}{3}, \frac{H_L}{D_t} = 1, \frac{w_d}{D_t} = \frac{1}{12}, \frac{H_p}{D_a} = \frac{1}{5}$$

McCabe et al., 2007

Cálculo da potência requerida: agitar fluidos newtonianos

➤ EXPERIMENTALMENTE: curvas do N_{P0} em função do N_{Re} para diversos tipos de agitadores.



- Curvas típicas para agitadores do tipo turbinas,
- Relações entre altura das pás do impulsor (H_p) e o diâmetro do agitador (D_a);
- Tanques com 4 defletores;
- Configurações geométricas padrão.

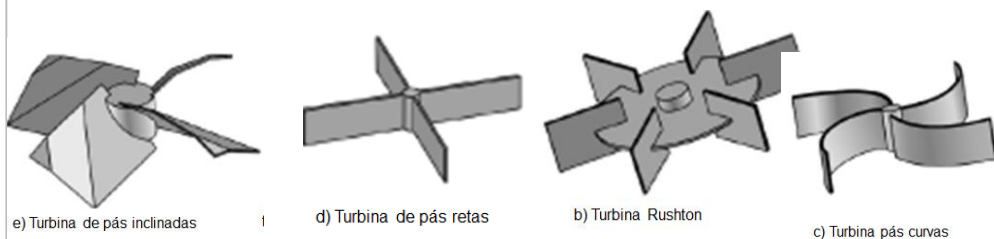
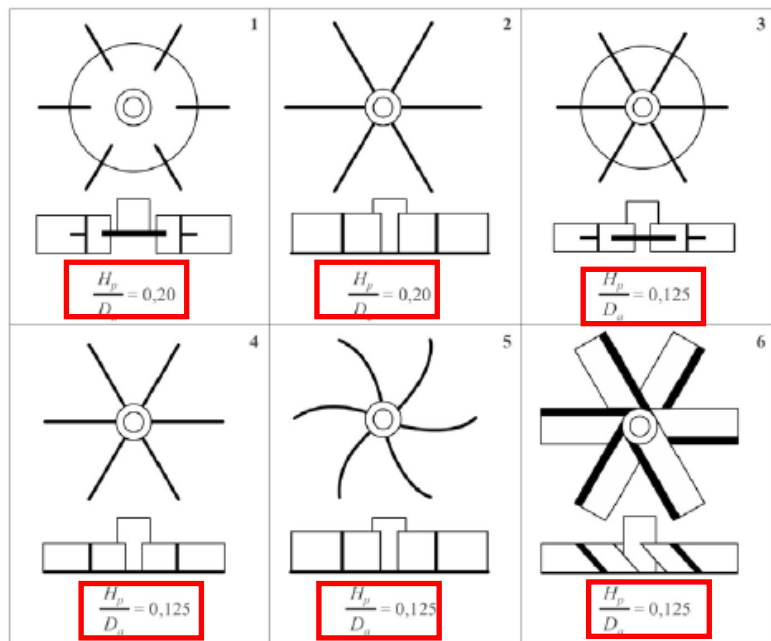
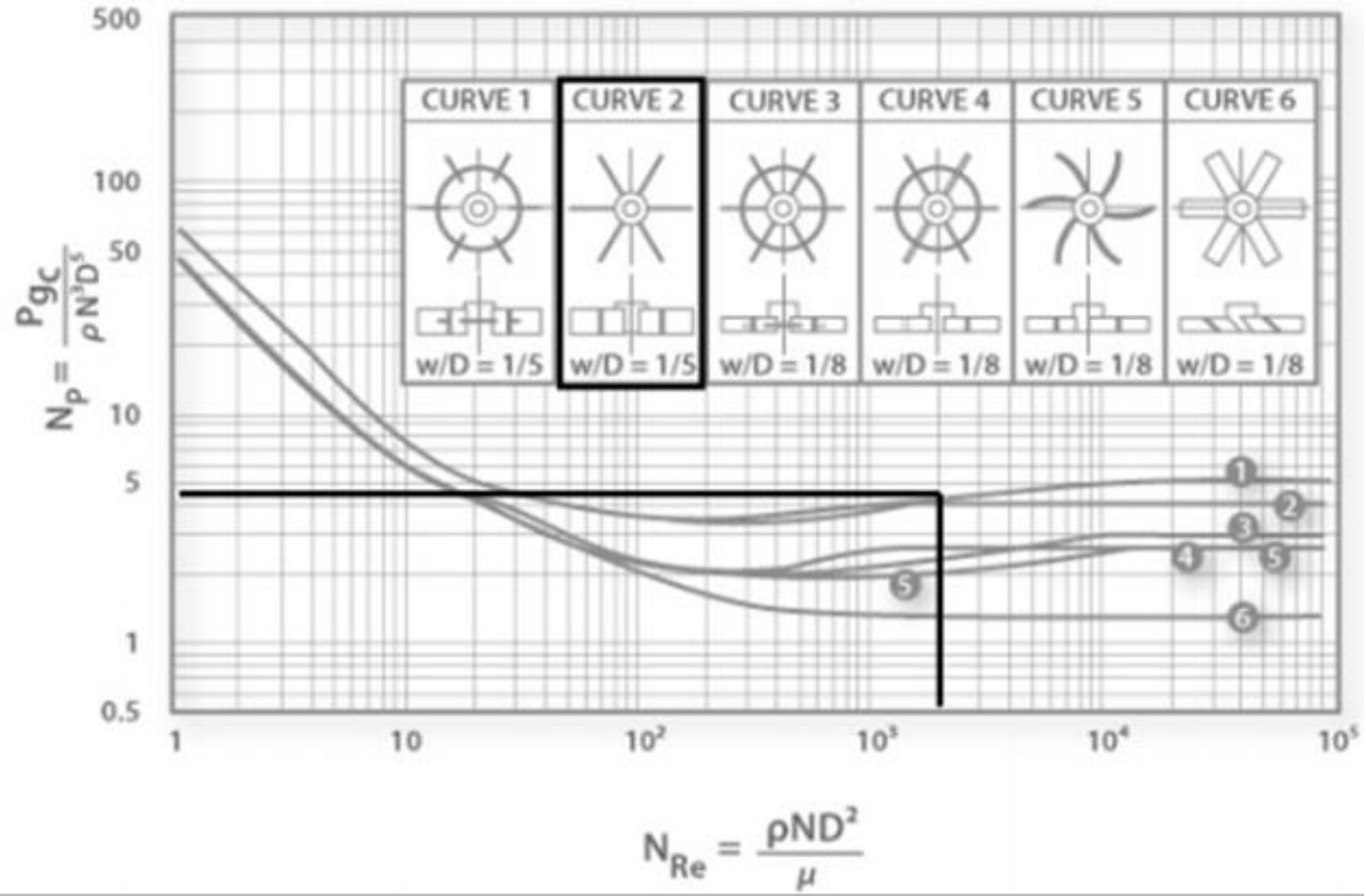


Figura 1 – N_{P0} em função N_{Re} para vários tipos de turbinas para agitação de fluidos newtonianos de características geométricas padrão.

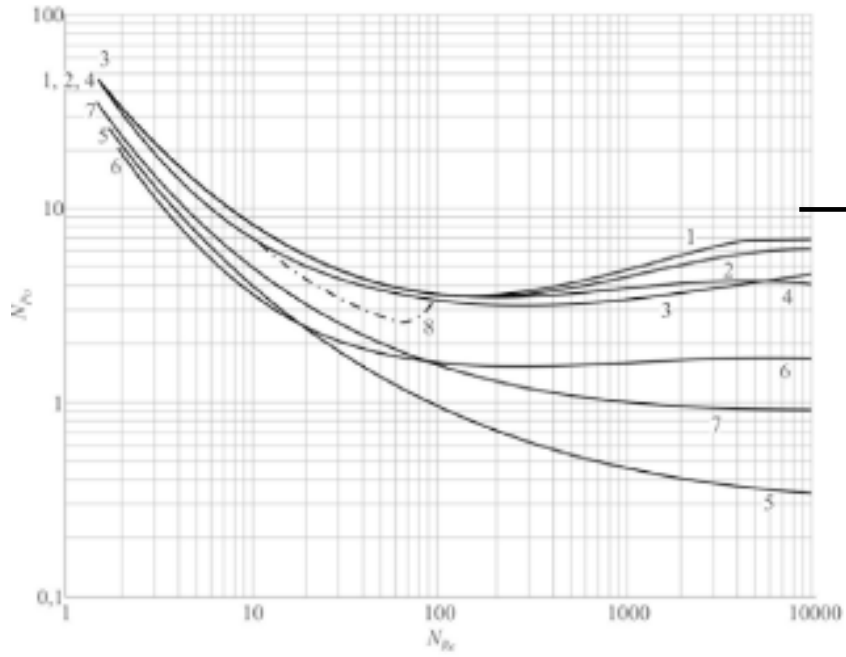
Cálculo da potência requerida: agitar fluidos newtonianos



SIMILARIDADE COM DIAGRAMA DE MOODY

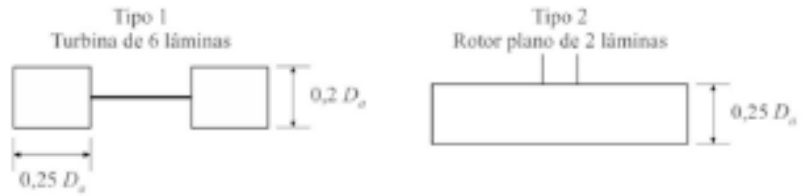
Cálculo da potência requerida: agitar fluidos newtonianos

➤ Figura 2. Agitador do tipo hélice e para agitação de fluidos pseudoplásticos



$N_{P0} \times N_{Re}$ – tanques características geométricas: $D_t/D_a = 3$; $2,7 \leq H_L/D_a \leq 3,9$; $0,75 \leq H_a/D_a \leq 1,3$.

▪ Curvas típicas para agitadores do tipo **hélice** e para fluidos **pseudoplásticos**.



Tipo de rotor	w_r/D_s	Curva
Tipo 1	0,17	1
Tipo 1	0,10	2
Tipo 1	0,04	3
Tipo 1 com lâminas curvas	0,10	4
Hélice com 3 pás, $s = D_s$	0,10	5
Tipo 2	0,10	6
Hélice com 3 pás, $s = 2D_s$	0,10	7
Tipo 1 com fluido pseudoplástico	0,04	8

SIMILARIDADE COM DIAGRAMA DE MOODY

Figura 2

Número de potência (N_{p0}) em função do número de Reynolds (N_{Re}) para vários tipos de impulsores em tanques com as seguintes relações geométricas: $D_t/D_a = 3$; $2,7 \leq H_L/D_a \leq 3,9$; $0,75 \leq H_a/D_a \leq 1,3$.

Cálculo da potência requerida: agitar fluidos newtonianos

- As curvas do N_{P0} em função do N_{Re} possuem similaridade com o diagrama de Moody
- Para regime laminar ($N_{Re} < 10$) a seguinte expressão é válida:

$$N_{P0} = \frac{K_p}{N_{Re}} \quad (6)$$

K_p – constante adimensional;

Região de turbulência: $N_{P0} = K_p$.

Valores de K_p – constantes, dependem do tipo de agitador, das dimensões do tanque e do número de defletores.

Exemplo 1.

Para agitar um líquido newtoniano de propriedades conhecidas ($\mu = 0,2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\rho=946 \text{ kg/m}^3$), será empregado um impulsor de turbina de seis pás retas com $\frac{H_p}{D_a} = 0,125$, em um tanque que tem características geométricas padrão, com quatro defletores.

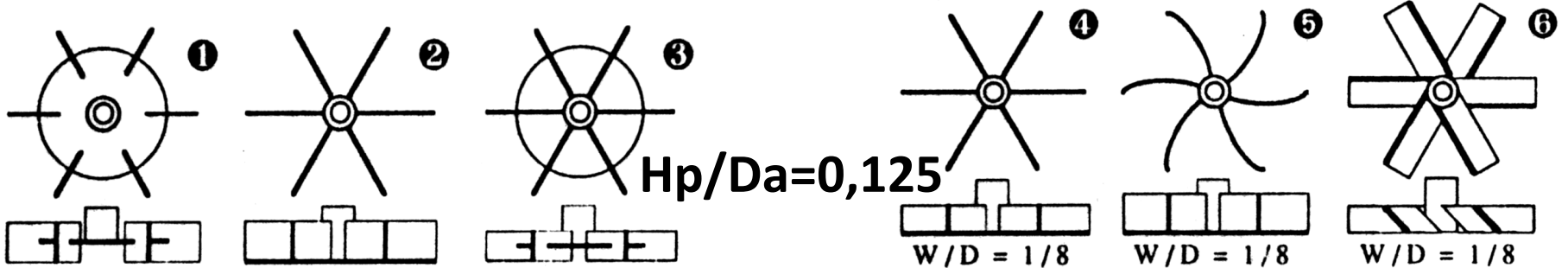
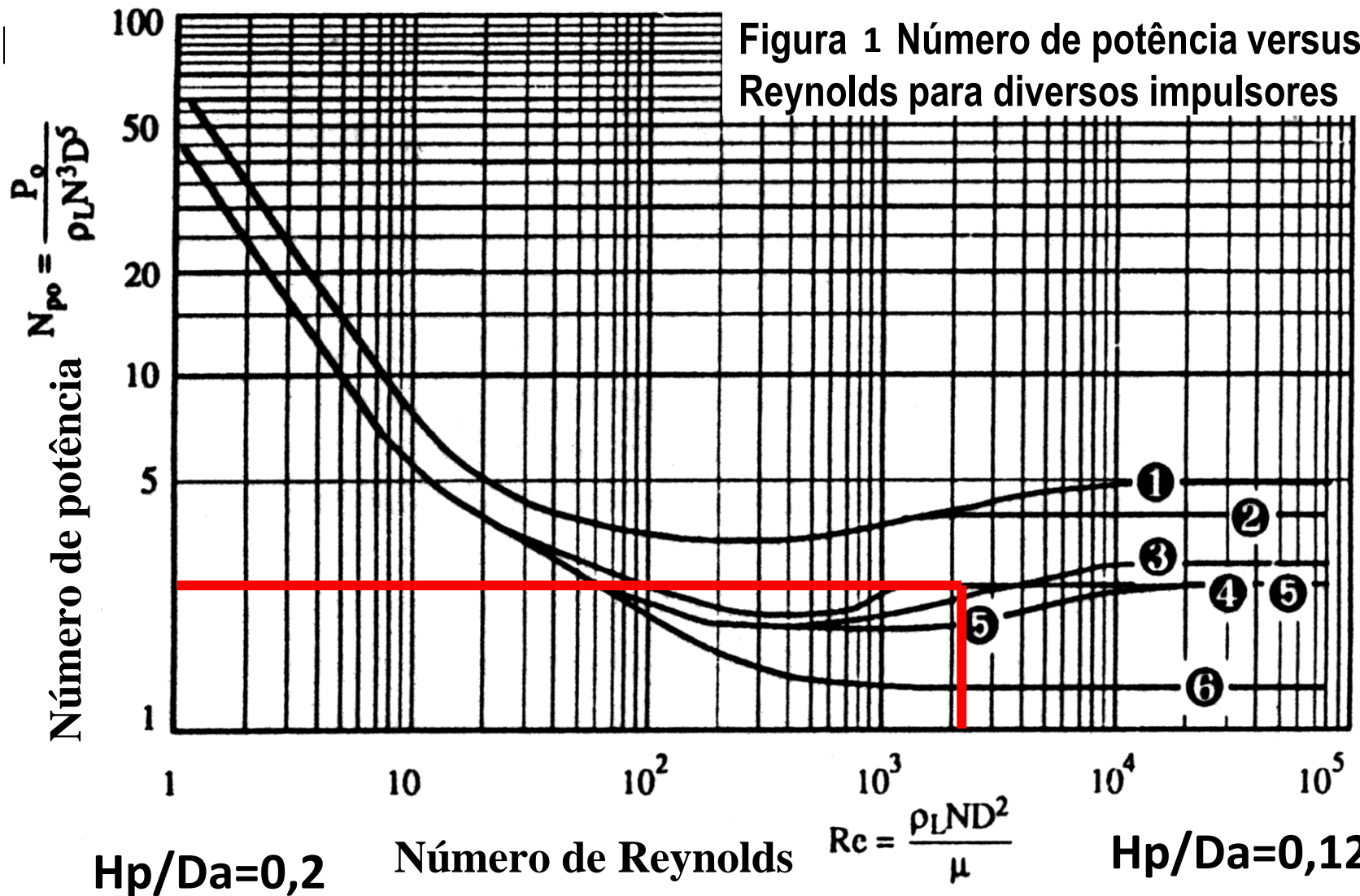
O diâmetro do impulsor é de 0,51 m e a frequência rotacional será de 100 rpm. Determine:

- A potência adequada para o motor; sabendo que conjunto do motor e sistema de transmissão apresenta eficiência de 70%;
- As dimensões do tanque.

Relações geométricas – tanque padrão: números adimensionais

$$\frac{D_t}{D_a} = 3, \frac{H_a}{D_a} = 1, \frac{H_L}{D_a} = 3, \frac{W_d}{D_t} = 0,1$$

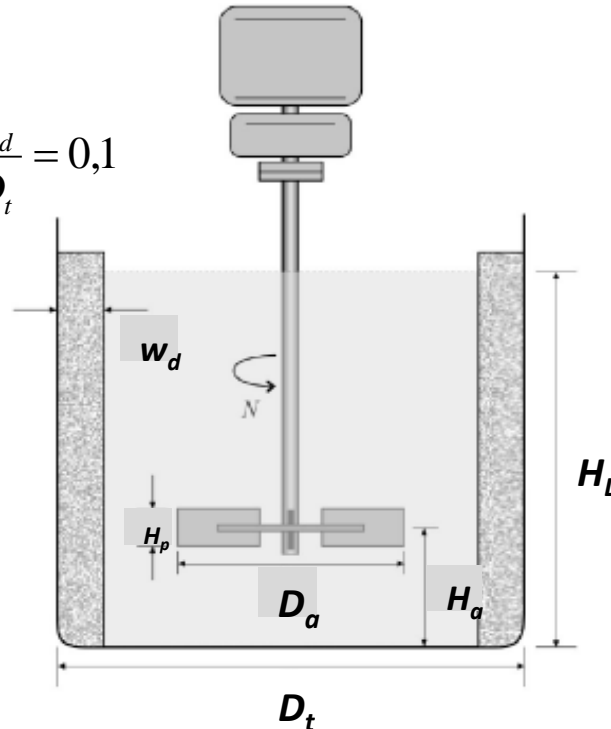
Figura 1 Número de potência versus Reynolds para diversos impulsores



Exemplo 2.

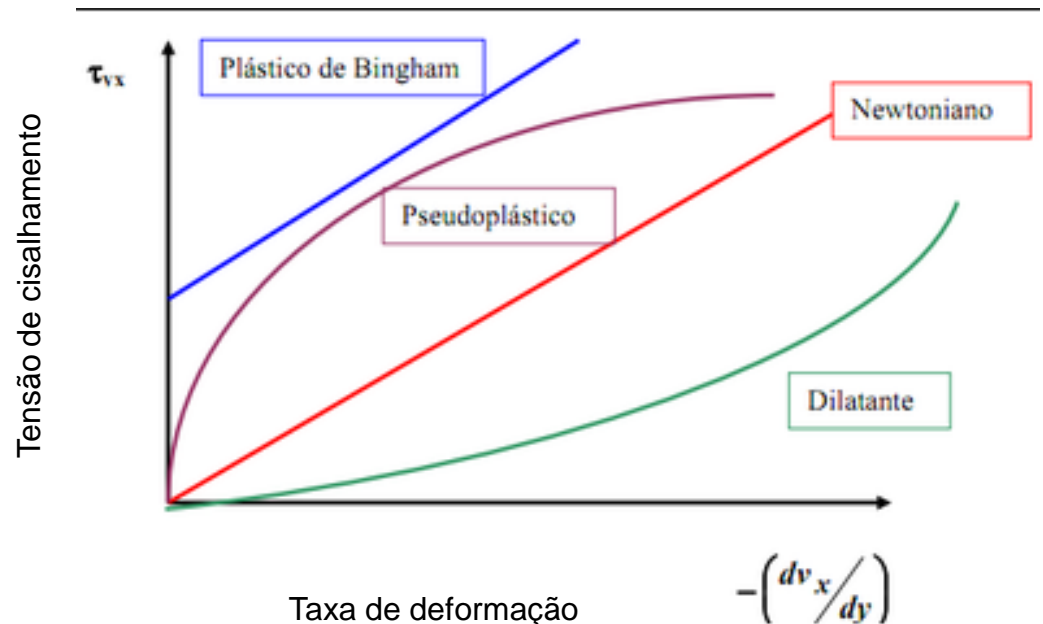
Em uma empresa que utiliza óleo de palma (azeite de dendê, $\rho = 919 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 8,5 \times 10^{-2} \text{ Pa.s}$) como matéria-prima, é necessário agitar o material por algum tempo antes de sua utilização, uma vez que durante o armazenamento pode haver solidificação de algumas frações lipídicas. Para essa aplicação, recomenda-se usar um impulsor do tipo turbina com pás inclinadas operando em frequência rotacional de 140 rpm. Deseja-se projetar um tanque de agitação encamisado com capacidade para 2000 L de óleo e que deverá ser construído de acordo com as configurações geométricas padrão. Dimensione o tanque e determine a potência de agitação necessária.

$$\frac{D_t}{D_a} = 3, \frac{H_a}{D_a} = 1, \frac{H_L}{D_a} = 3, \frac{w_d}{D_t} = 0,1$$



Cálculo da potência requerida: agitar fluidos não newtonianos

- Agitação de fluidos newtonianos: propriedade reológica em evidência é a viscosidade do fluido, que é independente da taxa de cisalhamento.
- Agitação de fluidos não newtonianos: propriedades reológicas **dependem** da taxa de cisalhamento, que varia ao longo do tanque, a viscosidade aparente varia;
- Regiões próximas ao agitador – zona de máximo cisalhamento – *queda da viscosidade aparente* para fluido **não newtoniano pseudoplástico**;
- Regiões próximas ao agitador – zona de máximo cisalhamento – *zona de viscosidade aparente máxima* para **fluido não newtoniano dilatante**.
- Para fluidos dilatantes, o aumento da viscosidade aparente em fç do aumento da taxa de cisalhamento, faz com que seja difícil atingir regime turbulento (Re quase sempre inferior a 10.000).



Cálculo da potência requerida: agitar fluidos não newtonianos

2 métodos principais para calcular a potência requerida para agitar fluidos não Newtonianos

- 1º Método: fluidos de comportamento não newtoniano que obedecem a **Lei de Potência**.
- 2º Método: **sem restrições** quanto ao comportamento reológico do fluido.

Cálculo da potência requerida: agitar fluidos não newtonianos

- 1º Método: fluidos de comportamento não newtoniano que obedecem a **Lei de Potência**;
- Fluidos com comportamento reológico descrito pelo modelo de lei de potência (equação Ostwald-de Waele):

$$\sigma = K\gamma^n$$

Lei de Potência (Modelo de Ostwald-de-Waele): um dos modelos mais utilizados para descrever o comportamento de fluidos não Newtonianos em amplas faixas de taxa de cisalhamento.

K – índice de consistência ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$) e n é o **índice de comportamento de escoamento** (adimensional), γ é tensão de cisalhamento.

Fluidos que seguem a lei da potência são subdivididos:

- Pseudoplásticos ($n < 1$)
- Dilatantes ($n > 1$)
- $n = 1$ Modelo de Potência se reduz ao Modelo Newtoniano, portanto K é viscosidade do fluido (μ).

Cálculo da potência requerida: agitar fluidos não newtonianos

- **Primeiro método** – base em números adimensionais, foi proposto para fluidos pseudoplásticos, sendo válido apenas para regime laminar.

$$N_{P_0} = 160 \left[\left(\frac{D_a^2 N^{2-n} \rho}{K} \right) \left(\frac{H_L}{H_a} \right)^n \left(\frac{D_a}{D_a + D_t} \right) \right]^{-1} 50^{n-1} \quad (7)$$

K – é o índice de consistência do fluido (Pa/sⁿ);

n – é o índice de fluxo ou índice de comportamento (adimensional).

- Correlação (eq. 7) proposta a partir de dados experimentais para fluidos pseudoplásticos e 4 diferentes tipos de agitadores;
- Válida para número de Reynolds modificado, N'_{Re} , menor que 10, definido por:

$$N'_{Re} = \frac{D_a^2 N^{2-n} \rho}{K} \quad (8)$$

Cálculo da potência requerida: agitar fluidos não newtonianos

- **Segundo método:** é o mais utilizado;
- baseia-se no cálculo da taxa de cisalhamento efetiva $(dv/dr)_{ef}$ existente no tanque, de modo que a viscosidade efetiva (μ_{ef}) correspondente à $(dv/dr)_{ef}$ seja igual à viscosidade de um fluido newtoniano em um sistema com mesmo consumo de energia, sob condições idênticas em regime laminar.

- Viscosidade efetiva é dada por:
$$\mu_{ef} = K \left(\frac{dv}{dr} \right)_{ef}^{n-1} \quad (9)$$

μ_{ef} – viscosidade efetiva (Pa.s)

- Assume-se que a taxa de cisalhamento efetiva obedece a uma relação linear em função da frequência rotacional do impulsor:

$$\left(\frac{dv}{dr} \right)_{ef} = K_s N \quad (10)$$

K_s – constante empírica (adimensional).

Proposta válida para vários sistemas de agitação em regime laminar.

Valor de K_s deve ser determinado experimentalmente.

Valores de K_s para diversos tipos de impulsores usados na agitação de fluidos pseudoplásticos ($n < 1$)

Tabela 5.4 Valores de K_s para diversos tipos de impulsores usados na agitação de fluidos pseudoplásticos ($n < 1$)

IMPULSOR	Nº DE DEFELETORES		D_a [m]	$\left(\frac{D_t}{D_a}\right)$	n [-]	K_s [-]
	$\left(\frac{w_d}{D_t}\right)$					
Turbina						
com seis pás planas	4 (0,1)		0,051 – 0,20	1,3 – 5,5	0,05 – 1,5	11,5 ± 1,5
com seis pás planas	Sem defletores		0,051 – 0,20	1,3 – 5,5	0,18 – 0,54	11,5 ± 1,4
duas com seis pás planas, separadas de $D_t/2$	4 (0,1)		–	3,5	0,14 – 0,72	11,5 ± 1,4
duas com seis pás planas, separadas de $D_t/2$	4 (0,1) ou sem defletores		–	1,02 – 1,18	0,14 – 0,72	11,5 ± 1,4
com seis pás inclinadas a 45°	4 (0,1) ou sem defletores		0,10 – 0,20	1,33 – 3,0	0,21 – 0,26	13 ± 2
com seis pás inclinadas a 45°	4 (0,1) ou sem defletores		0,10 – 0,20	1,33 – 3,0	1,0 – 1,42	13 ± 2
Hélice marinha						
com três pás (impulsão descendente)	Sem defletores, eixo vertical ou eixo inclinado a 10°, instalado a $D_t/6$		0,127	2,2 – 4,8	0,16 – 0,4	10 ± 0,9
com três pás (impulsão ascendente)	Sem defletores, eixo vertical ou eixo inclinado a 10°, instalado a $D_t/6$		0,127	2,2 – 4,8	0,16 – 0,4	10 ± 0,9
com três pás (impulsão descendente)	Sem defletores, eixo inclinado a 10°, instalado a $D_t/6$		0,305	1,9 – 2,0	0,16 – 0,4	10 ± 0,9
com três pás (impulsão descendente)	Sem defletores, eixo vertical		0,305	1,9 – 2,0	0,16 – 0,4	10 ± 0,9
de passo quadrado com três pás	4 (0,1)		0,152	1,67	0,16 – 0,6	10
de passo duplo com três pás (impulsão descendente)	Sem defletores, eixo inclinado a 10°, instalado a $D_t/6$			1,4 – 3,0	0,16 – 0,4	10 ± 0,9
de passo duplo com três pás (impulsão descendente)	Sem defletores, eixo vertical			1,4 – 3,0	0,16 – 0,4	10 ± 0,9
de passo quadrado com quatro pás	4 (0,1)		0,12	2,13	0,05 – 0,61	10
Pás de duas folhas	4 (0,1)		0,09 – 0,13	2 – 3	0,16 – 1,68	10
Âncora	Sem defletores		0,28	1,02	0,34 – 1,0	11 ± 5
Impulsores cônicos	Sem defletores ou 4 (0,08)		0,10 – 0,15	1,92 – 2,88	0,34 – 1,0	11 ± 5

Cálculo da potência requerida: agitar fluidos não newtonianos – 2º método

➤ Selecionado o sistema de agitação e a definição da frequência rotacional de operação do impulsor (N);

➤ A potência de agitação necessária pode ser calculada seguindo:

i) Calcula-se a taxa de cisalhamento efetiva (eq. 10); $\left(\frac{dv}{dr}\right)_{ef} = K_s N$

i) Determina-se a viscosidade efetiva (eq. 9) e com esse valor obtém-se Reynolds (eq. 3);

$$\mu_{ef} = K \left(\frac{dv}{dr}\right)_{ef}^{n-1}$$

i) Avalia-se o N_{P_0} a partir das correlações ou diagramas apropriados para o impulsor considerado ou, alternativamente, aplica-se a equação (6) em que K_p é uma constante e depende do tipo de agitador e da geometria do sistema.

$$N_{P_0} = \frac{K_p}{N_{Re}} \quad (6)$$

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu_{ef}} \quad (3.1)$$

Exemplo 3.

Em uma indústria de geleias, suco de amora concentrado (56 °Brix) deve ser mantido, sob agitação, a 22°C. Nessas condições, o suco apresenta densidade de 1277 kg/m³ e os seguintes parâmetros reológicos: $k = 26,4 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ e $n = 0,62$. O tanque de agitação é equipado com um agitador tipo turbina, com 6 pás retas, correspondente ao impulsor Tipo 1, com diâmetro igual a 20 cm e quatro defletores com largura igual a 10 cm. A frequência rotacional do impulsor é de 110 rpm e a capacidade do tanque deve ser adequada para armazenar 215 kg de suco. Determine: a) diâmetro e altura do tanque; b) a potência necessária para a agitação aplicando os 2 métodos descritos anteriormente.

$$N_{P_0} = 160 \left[\left(\frac{D_a^2 N^{2-n} \rho}{K} \right) \left(\frac{H_L}{H_a} \right)^n \left(\frac{D_a}{D_a + D_t} \right) \right]^{-1} 50^{n-1}$$

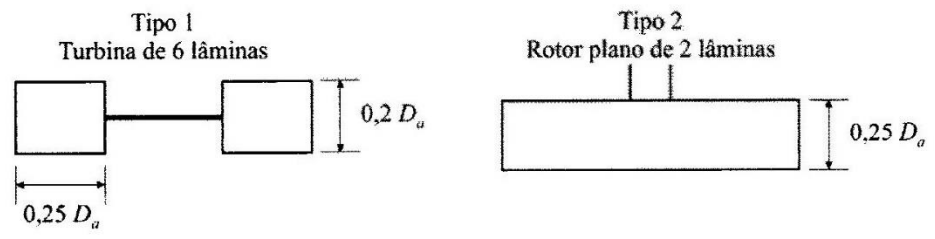
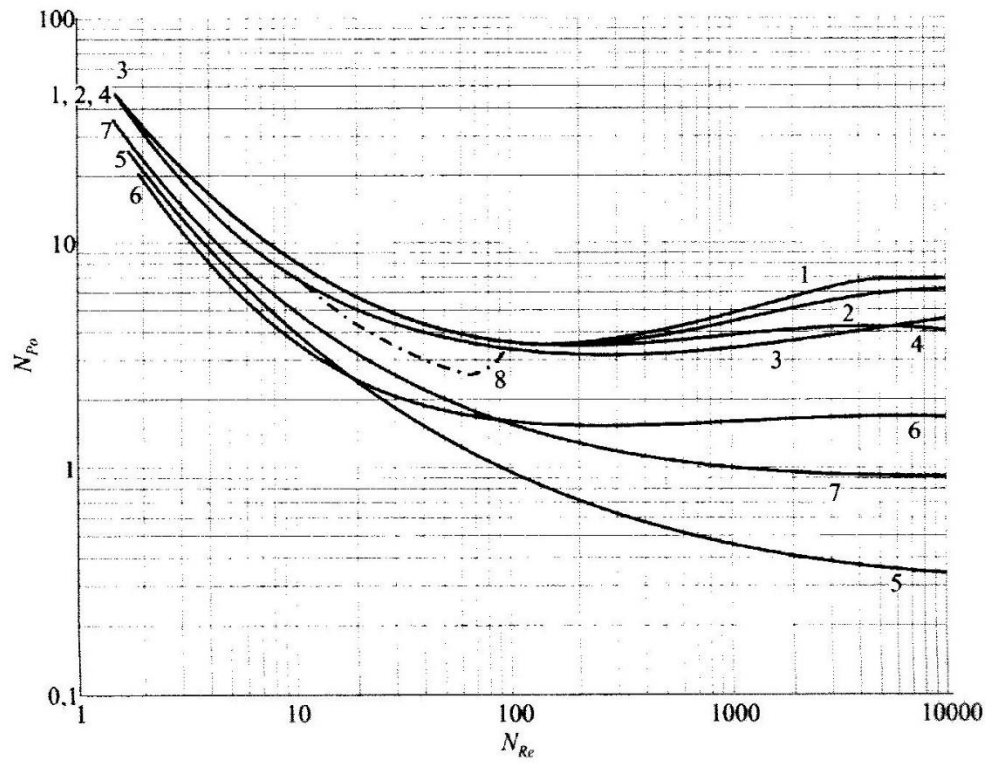
$$N'_{\text{Re}} = \frac{D_a^2 N^{2-n} \rho}{K} \quad N_{\text{Re}} = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu_{ef}}$$

$$\mu_{ef} = K \left(\frac{dv}{dr} \right)_{ef}^{n-1}$$

$$\left(\frac{dv}{dr} \right)_{ef} = K_s N$$

$K_s = 11,5$ Tabela (impulsor tipo turbina 6 pás)

Exemplo 3.



Tipo de rotor	w_d/D_t	Curva
Tipo 1	0,17	1
Tipo 1	0,10	2
Tipo 1	0,04	3
Tipo 1 com lâminas curvas	0,10	4
Hélice com 3 pás, $s = D_a$	0,10	5
Tipo 2	0,10	6
Hélice com 3 pás, $s = 2D_a$	0,10	7
Tipo 1 com fluido pseudoplástico	0,04	8

Cálculo da potência requerida: agitar fluidos não newtonianos

- Agitadores para fluidos de alta viscosidade aparente – fita helicoidal (FH) e fita helicoidal com parafuso (FHP) são amplamente utilizados.
- Tabela: valores de K_s para esses tipos de impulsor e sua dependência em função do índice de fluxo (n).

Cálculo da potência requerida: agitar fluidos não newtonianos

Tabela 5.5 Valores de K_s para impulsores do tipo fita helicoidal (FH) e fita helicoidal e parafuso (FHP)

IMPULSOR	$\left(\frac{D_t}{D_a}\right)$	n	K_s
FH	1,02 - 1,12	0,4 - 1	66,06
FH	1,10 - 1,11	0,35 - 1	27
FHP	1,03	0,35 - 1	24,58
FH	1,053	0,5 - 1	36,73
FH	1,056	0,27 - 1	30
FH	1,04 - 1,19	0,5 - 1	27,6
FHP	1,056 - 1,118	0,26 - 1	30,6
FH	1,11 - 1,37	0,17 - 0,65	79,85
FH	1,05 - 1,33	0,35 - 0,75	24,68
FH	1,05 - 1,33	-	26,8
FH	1,11	0,18 - 1	17 - 40

Fonte: Brito-De La Fuente et al. (1997).

Cálculo da potência requerida: agitar fluidos não newtonianos

- Alguns autores estudaram o consumo de potência para agitação de fluidos pseudoplásticos e fluidos newtonianos com impulsores FH e FHP instalados em tanques com as relações geométricas:

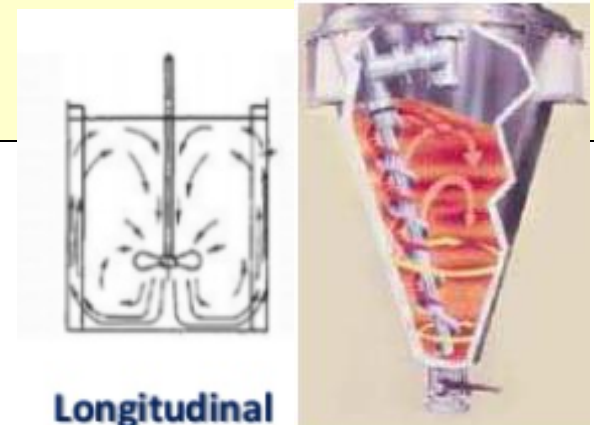
$$\frac{D_t}{D_a} = 1,135, \frac{w_f}{D_a} = 0,108 a 0,135, \frac{w_p}{w_f} = 1,17 a 1,25, \frac{H_L}{D_a} = 2,07, \frac{s}{D_a} = 0,5 ou 1$$

w_f , w_p e s – largura da fita, largura do parafuso e o passo do impulsor, respectivamente (m).

s - O movimento rotatório dá ao fluido um movimento helicoidal, uma rotação completa move o fluido longitudinalmente a uma distância fixa, dependendo do ângulo das lâminas do propulsor.

A razão entre esta distância e o diâmetro do propulsor é chamada passo (s) do agitador.

Passo ou “pitch” – distância entre as linhas de fluxo.



Cálculo da potência requerida: agitar fluidos não newtonianos

- Regime laminar ($N_{Re} \leq 100$) foi determinada a correlação para cálculo do N_{Po} agitadores FH e FHP:

$$N_{Po} = 173,1 N_{Re}^{-1} \left(\frac{s}{D_a} \right)^{-0,72} \left(\frac{w_f}{D_a} \right)^{0,14} \quad (11)$$

- Equação (11) deve ser empregada para o cálculo N_{Po} .

- Para fluidos pseudoplásticos a constante K_s é determinada por:

$$K_s = 38,27 \left(\frac{w_f}{D_a} \right)^{-0,024} \left(\frac{s}{D_a} \right)^{-0,135} (0,814)^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

Exercício 4.

Concentrado de polpa de tomate (25 °Brix) será aquecido de 35 °C até 45°C em um tanque encamisado de 300 L, acoplado com agitador de fita helicoidal com parafuso, operando a frequência angular de $0,85\text{s}^{-1}$, com as seguintes relações geométricas:

$$\frac{D_t}{D_a} = 1,135, \frac{H_L}{D_a} = 1, \frac{W_f}{D_a} = 0,108, \frac{W_p}{W_f} = 1,25, \frac{S}{D_a} = 1$$

Nessas condições, o concentrado de polpa de tomate apresenta comportamento reológico pseudoplástico: $K=31,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ e $n=0,35$ a 20°C ; e $K=22,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ e $n=0,35$ a 50°C e densidade igual a 1000 kg/m^3 . Calcular o consumo de potência.

OBS: verificar como a viscosidade efetiva varia com a temperatura, caso não varie muito, considerar o maior valor.

Fatores de correção nos cálculos de agitadores

São 2 os casos em que os fatores de correção são utilizados:

- a) Quando o sistema de agitação tem mais de 1 impulsor no tanque;
- b) Quando as dimensões do sistema de agitação são diferentes ou não se encaixam nas configurações geométricas do tipo padrão.

Fatores de correção nos cálculos de agitadores

a) Sistemas com mais de 1 impulsor

- Conservar a proporção (suposição): $HL \approx Dt$
- Para cada impulsor adicional, a potência total P_{oT} (W) é:

$$P_{oT} = P_o n_i \quad (13)$$

- P_o - Potência de cada impulsor (W), n_i - número de impulsores.

Fatores de correção nos cálculos de agitadores

b) Sistema que não seguem as configurações geométricas padrão

- Aplicar fator de correção f' no cálculo do número de potência:

$$f' = \sqrt{\frac{\left(D_t/D_a\right)_{Real} \left(H_L/D_a\right)_{Real}}{\left(D_t/D_a\right)_{Padrão} \left(H_L/D_a\right)_{Padrão}}} \quad (14)$$

Padrão

$$\frac{D_t}{D_a} = 3, \frac{H_a}{D_a} = 1, \frac{H_L}{D_a} = 3, \frac{w_d}{D_t} = 0,1 \quad \frac{D_t}{D_a} = 3; 2,7 \leq H_L/D_a \leq 3,9; 0,75 \leq \frac{H_a}{D_a} \leq 1,3$$