

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SISTEMAS DE
PROCESSOS QUÍMICOS E INFORMÁTICA



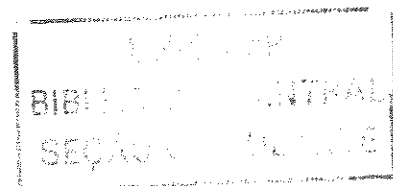
Dimensionamento do eixo do impelidor em sistemas de agitação e mistura para processos industriais

Autor : Eduardo José Barbosa

Orientador : Prof. Dr. Elias Basile Tambourgi

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Química, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Novembro de 2004
Campinas - SP



UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	ATIV/UNICAMP B234d
V	EX
TOMBO SC.	65014
PROC.	16-P-00086-05
C	☐
D	☒
PREÇO	11,00
DATA	02/10/05
Nº CPD	811.10359855

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

B234d Barbosa, Eduardo José
Dimensionamento do eixo do impelidor em sistemas de
agitação e mistura para processos industriais / Eduardo José
Barbosa.--Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Elias Basile Tambourgi.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Mistura (Química). 2. Hélices. 3. Eixos. 4. Agitação.
I. Tambourgi, Elias Basile. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: How to size impeller shaft on industrial processes
Palavras-chave em Inglês: Blending, Impellers, Shaft e Mixing
Área de concentração: Sistemas de processos químicos e informática
Titulação: Mestre em Engenharia Química
Banca examinadora: Ana Paula Brescancini Rabelo e Luiz Carlos Bertevello
Data da defesa: 17/11/2004

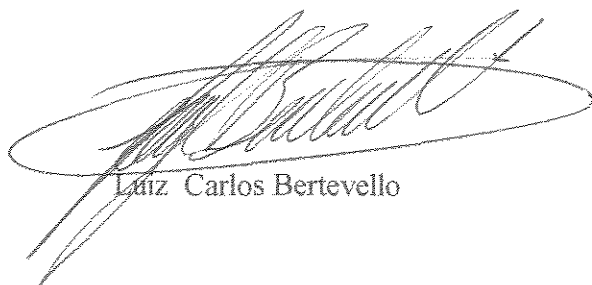
Dissertação de Mestrado , defendida por Eduardo José Barbosa ,em 17 de novembro de 2004 , e aprovada pela banca constituída pelos seguintes doutores



Elias Basile Tambourgi



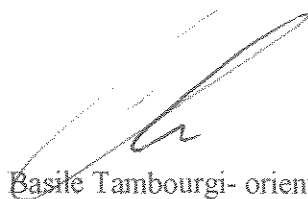
Ana Paula Brescancini Rabelo



Luiz Carlos Bertevello

866515000

Esta versão corresponde à final da Dissertação de Mestrado defendida por Eduardo José Barbosa em 17 de novembro de 2004.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'E' followed by a cursive 'B' and 'T', representing the name Elias Basile Tambourgi.

Prof Dr Elias Basile Tambourgi- orientador

Agradecimentos

A Deus, autor da vida, pela força e sustentação nesta caminhada.

Ao Doutor Elias Basile Tambourgi pela orientação e receptividade.

Aos membros da banca.

A minha esposa Edna e os filhos Caio, Jonathas e Carolina, pela compreensão e apoio.

Aos meus pais pela ajuda nos passos que antecederam a este.

Aos colegas de trabalho pela colaboração na elaboração e confecção dos desenhos, experimentos realizados e pela oportunidade da concretização deste trabalho.

“ Porque o Senhor dá a sabedoria; da sua boca é que vem
o conhecimento e o entendimento.”

Provérbios 2-6

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de cálculo, de uso simples, porém de caráter robusto, a ser utilizado na seleção de sistemas de agitação e mistura, que englobam:

- Cálculo/dimensionamento do eixo do agitador para torção e flexão tipo “eixo vazado” para conjunto único e de múltiplos impelidores;
- Verificação da Rotação Crítica para sistemas de agitação que possuem eixos em balanço;
- Estimar a potência consumida em sistemas agitados que utilizam impelidor(es) para produtos com viscosidades variadas.

O programa computacional é estruturado a partir do levantamento de equações pertinentes aos sistemas estudados bem como é fruto de experiências já consolidadas em aplicações práticas (industriais) onde o mesmo pode ser utilizado no desenvolvimento e fabricação de tanques, vasos, reatores e sistemas de agitação.

O programa desenvolvido, em ambiente Excel pode ser utilizado em substituição aos softwares comerciais, de elevado custo de aquisição e atualização.

As proporções recomendadas para uma melhor eficiência do sistema de agitação e mistura, como por exemplo, a altura de líquido x diâmetro do vaso, serão abordadas aqui, bem como a verificação da mudança do comportamento da agitação influenciados pela variação da geometria do tanque e do impelidor e da viscosidade (características do fluido) no processamento no qual eles estão inseridos.

Palavras chaves : agitação e mistura, impelidor e eixo.

ABSTRACT

The objective of this work is to present a calculation methodology, of simple use, however a efficient form to design and to be used on mixing systems selection that comprise:

- Agitator hollow shaft design/calculation for bending and torsion for single and multiple impellers conditions;
- Check and compute Critical Speeds in Agitated Vessels that have overhung shafts.
- Estimating power consumption by impellers on mixing of products with several viscosities;

The computational tool was based on several research, as well is a result of the experiences yet consolidated on industrial real applications where it is used to design agitated vessels, tanks, reactors and agitation systems.

Computer method run in Excel and can be used on substitution of commercial programs that have high acquisition and up-date prices.

Recommended dimensions, for example, how the level of liquid x vessel diameter modify the agitation efficiency, will be treated here, then also, will see the modification on mixing performance by influence varying geometry (impeller and tank) and the viscosity (fluid characteristics) on processes were are involved.

Keywords: blending, mixing, impeller shaft.

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XIV
NOMENCLATURA	XV
1 - Introdução	1
1.1. Dimensionamentos em Equipamentos	1
1.2. Objetivos	2
2 - Revisão Bibliográfica	
2.1. - Agitação	3
2.2. - Reologia dos Fluidos	4
2.2.1. Viscosidade	4
2.2.2. Fluido Newtoniano	5
2.2.3. Fluido Não-Newtoniano	6
2.3. - Componentes dos Equipamentos em Agitação	6
2.4. - Tampos	9
3 - Impelidores	11
3.1. Introdução	11
3.2. Tipos de Impelidores	12
3.2.1. Pás Retas	12

3.2.2. Pás Inclínadas 45°	13
3.2.3. Alta Eficiência	13
3.2.4. Hélice Naval	14
3.3. Impelidores para regime laminar	15
3.3.1. Misturadores “Helical Ribbon”	15
3.3.2. Âncora	16
3.4. Impelidores de Construção Sanitária	17
3.4.1. Agitador Magnético	17
3.4.2. Agitador “PolyMixer”	19
3.5. Impelidor Alto Cisalhamento	20
3.5.1. Dispersor dente de serra	20
3.6. Características individuais dos Impelidores	21
3.7. Chicanas	24
3.7.1. Introdução	24
3.7.2. Desvantagens do vórtice	25
 4 - Nível de Agitação	 26
4.1. Velocidade Média	26
4.2. Número de bombeamento	26
4.3. Determinação do N.A (Nível de Agitação)	27
4.4. Método para seleção do misturador	28
4.5. Parâmetros geométricos na Agitação	30

5 - Eixo do Acionamento	32
5.1. Requerimentos Mecânicos	32
5.2. Tensão de Torção e Flexão	32
5.3. Velocidades Críticas	33
6 - Materiais e Métodos	35
6.1. Introdução	35
6.2. Critérios de Seleção do Acionamento	35
6.2.1. Adimensionais	36
6.3. Cálculo da Potência consumida pelo agitador	37
6.4. Curvas de Potência	38
6.5. Cálculo do diâmetro do eixo	39
6.5.1. Torção e Flexão	39
6.5.2. Rotação Crítica	43
7 - Resultados e Exemplos	49
7.1. Proposta do Programa	49
7.2. Cálculo da Potência estimada	49
7.3. Dados de entrada determinação do diâmetro do eixo	50
7.4. Exemplo n.º 1	51
7.5. Exemplo n.º2	52
7.6. Exemplo n.º3	54
8 - Conclusões e Sugestões	56
Referências	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Viscosidade modelo Isaac Newton.....	4
Figura 2 - Perfil de velocidades.....	5
Figura 3 - Tensão x deformação	6
Figura 4 - Ilustração de tanque com sistema de agitação e camisa	8
Figura 5.1 - Tampo torisférico ASME 10%.....	9
Figura 5.2 - Tampo ASME 2:1 - 0,904.....	9
Figura 5.3 - Tampo toricônico.....	10
Figura 5.4 - Tampo abaulado reverso	10
Figura 6 - Impelidor de pás retas 90°.....	12
Figura 7 - Impelidor de pás inclinadas a 45 °.....	13
Figura 8 - Impelidor alta eficiência.....	13
Figura 9 - Impelidor hélice naval.....	14
Figura 10 - Agitador "Helical Ribbon"	15
Figura 11 - Impelidor tipo âncora com raspadores empregado em fluidos com alta viscosidade (newtoniano ou não newtoniano)	16
Figura 12 - Agitador magnético montado no fundo do tanque	17
Figura 13 - Sistema de agitação que emprega agitador magnético	18
Figura 14 - Impelidor tipo "polymixer"	20
Figura 15 - Dispersor dente de serra	21
Figura 16 - Diagrama de agitadores com seus respectivos níveis de fluxo de bombeamento e cisalhamento	22
Figura 17 - Tipos de fluxo.....	23
Figura 18 - Comparação da agitação com e sem chicanas para impelidor tipo pás inclinadas 45°	24

Figura 19 - Número de bombeamento x número de Reynolds para impelidor alta eficiência.....	27
Figura 20 - Parâmetros Geométricos	31
Figura 21 - Pás montadas com estabilizadores.....	34
Figura 22 - Característica da curva de potência	37
Figura 23 - Comparação das curvas de potência entre impelidor naval e impelidor alta eficiência.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Processos de agitação, mistura e dispersão	3
Tabela 2 - Critério de projeto para uso de chicanas.....	25
Tabela 3 - Escala de agitação	28
Tabela 4 - Definições básicas para agitação com sólidos	29
Tabela 5 - Relação de velocidade periférica (v_p) x parâmetros de agitação.....	29
Tabela 6 - Valores máximos recomendados de Z/T , em função do número de Reynolds, tipo e quantidade de impelidores.....	30
Tabela 7 - Comparação dos resultados para um mesmo sistema de agitação. Exemplo n.º 2.....	54
Tabela 8 - Comparação dos resultados para um mesmo sistema de agitação. Exemplo n.º 3.....	55

NOMENCLATURA

C	distância do fundo do vaso ao impelidor
D	diâmetro do impelidor
D _e	diâmetro externo do eixo
d	diâmetro interno do eixo
N	rotação do impelidor
S	distância entre impelidores
Z	altura de líquido no vaso
T	diâmetro do vaso
σ_x	tensão devido ao momento fletor
τ_{xy}	tensão devido à torção
M _f	momento fletor na seção crítica
M _t	momento torçor na seção crítica
ρ	peso específico
l _e	comprimento do eixo
F _f	Força fletora
w	Largura da chicana
Q _p	Capacidade de bombeamento
A _v	Área da Secção Transversal
V _p	Velocidade periférica da pá
N _s	Rotação Crítica eixo
N _w	Rotação Crítica impelidor
N _c	Rotação Crítica sistema

N	Número de impelidores
N_p	Número de potência
N_q	Número de bombeamento
N_{pr}	Número de Prandtl
N_{pe}	Número de Peclet
Fr	Número de Froude
Re	Número de Reynolds
d	densidade relativa
IA	Intensidade de agitação
NA	Nível de Agitação
f_B	fator de espaçamento entre mancais

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Dimensionamentos em equipamentos

Devido à grande exigência do mercado, há atualmente uma necessidade constante no aprimoramento dos processos industriais e um conhecimento bem definido do que se faz, como? e para quê?.

A necessidade do uso de ferramentas confiáveis e precisas no desenvolvimento e dimensionamento de equipamentos é indispensável, para que obtenha-se resultados esperados e evite surpresas dentro de um processo, o que pode ocorrer com frequência devido a não utilização correta de parâmetros de projeto na fase de elaboração do mesmo.

Muitas empresas de pequeno porte ou em crescimento não conseguem adquirir os programas disponíveis no mercado para dimensionamentos de vasos agitados devido a altos custos (compra, manutenção e licenciamento) destes softwares.

Diversos trabalhos que tratam dos dimensionamentos na área de agitação e mistura têm sido publicados, porém ainda há uma falta na literatura de abordagem de tópicos específicos de aplicações nas engenharias. Equipamentos cada vez mais leves e eficientes estão sendo exigidos pelo mercado. Nota-se o crescimento da construção de equipamentos e vasos de processos em alumínio e de sistemas de agitação melhor dimensionados, reduzindo assim o peso e custos do sistema.

A utilização do eixo do misturador com geometria de um tubo cilíndrico oco, para diversos impelidores, está cada vez mais presente em aplicações industriais, porém, ferramentas computacionais disponíveis mais utilizadas atualmente na

engenharia como o CFD, CFX entre outros, não abrangem este tópico de forma completa.

A inserção destes tópicos numa ferramenta computacional se faz necessário pela diversidade da aplicação onde se busca melhor qualidade com maior custo-benefício nos processos industriais acompanhado ao expressivo aumento na procura para aquisição de equipamentos e tecnologias nacionais de aplicação em sistemas de agitação e mistura.

A influência da geometria de tanques e das pás na eficiência de mistura e consumo de potência também são pouco difundidos e conhecidos por técnicos nas empresas onde se utilizam estes sistemas.

1.2. Objetivos

O trabalho visa a obtenção de uma melhor eficiência dos processos industriais, enfocando o aprimoramento (estudo e pesquisa) desde o projeto (dimensionamento) de equipamentos (tanques agitados), bem como a qualidade do produto final (eficiência da mistura), custos, etc., servindo o tal como suporte para diversos segmentos da indústria.

Outro objetivo também deste trabalho é obter um melhor entendimento de como a geometria (do impelidor e do recipiente), a viscosidade e outros fatores afetam o padrão de fluxo, necessário na seleção correta do conjunto impelidor-eixo-acionamento .

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Agitação

A agitação pode ser definida como operações que objetivam reduzir não uniformidades ou gradientes na composição, propriedades ou na temperatura do material em relação a sua massa total. (Uhl & Gray, 1966)

A agitação ajuda na execução de processos químicos e processamentos físicos de diferentes aplicações, conforme a tabela abaixo citada por Nagata (1975).

Tabela 1- Processos de Agitação, Mistura e Dispersão.

APLICAÇÃO	PROCESSAMENTO FÍSICO	PROCESSAMENTO QUÍMICO
Líquido-sólido	Suspensão	Dissolução
Líquido-gás	Dispersão	Absorção
Líquidos imiscíveis	Emulsão	Extração
Líquidos miscíveis	Mistura	Reação
Movimentação de fluido	Bombeamento	Transferência de calor

Num sistema de agitação para determinado tipo de processo, deseja-se que todo o fluido agitado possua as mesmas características, em qualquer ponto do tanque.

Nestas condições, um impelidor teoricamente deveria ser capaz de produzir a circulação do fluido por todo o volume do tanque.

Também a velocidade das correntes de fluxo que deixam o impelidor, deve ser suficientemente forte para atingir as partes mais remotas do tanque.

As correntes de fluxo que deixam o impelidor, carregam uma quantidade de energia cinética. Esta energia é dissipada através de atrito.

Um material homogêneo pode ser agitado sem sofrer mistura com outros materiais (sistemas monofásicos), ou seja, apenas criar uma movimentação para facilitar a troca térmica ou alguma outra condição que o processo exija.

2.2. Reologia dos fluidos

2.2.1. Viscosidade

A viscosidade é uma das variáveis que caracteriza reologicamente uma substância. De um modo geral, viscosidade é uma propriedade da resistência à deformação quando sujeito a esforços de escorregamento sobre um fluido.

Viscosidade é a resistência de um fluido ao movimento, devido ao seu atrito interno.

Na figura 1, são consideradas duas lâminas perfeitamente planas e paralelas entre si, muito próximas, separadas por um fluido qualquer.

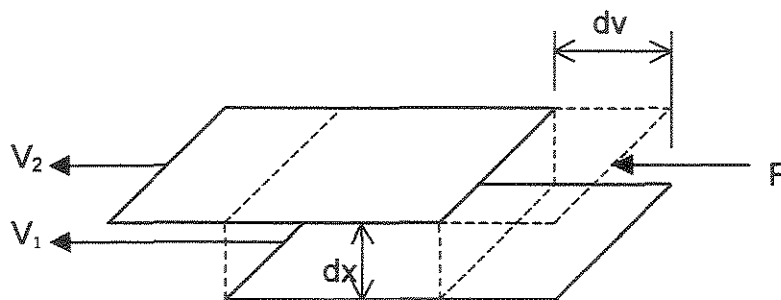


Figura 1 – Viscosidade modelo Isaac Newton (1654).

As duas lâminas se movem na mesma direção com velocidades diferentes V_1 e V_2 .

Decorrido um determinado tempo " t ", a distribuição de velocidades será linear, conforme figura 2.

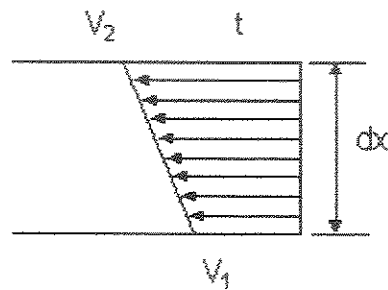


Figura 2 – Perfil de velocidades.

Quanto:

- Maior a velocidade - maior força para cisalhar a película.
- Menor dx – maior força para cisalhar a película.

2.2.2. Fluido newtoniano

Num fluido newtoniano (o exemplo mais comum é a água) existe uma proporcionalidade linear entre a tensão de cisalhamento e a deformação existente, ou seja, a viscosidade (μ) a uma dada temperatura independe da velocidade de deformação dv/dx , conforme representado na equação 1 e figura 3.

$$\tau = \mu \cdot [\text{taxa de deformação}] \quad (1)$$

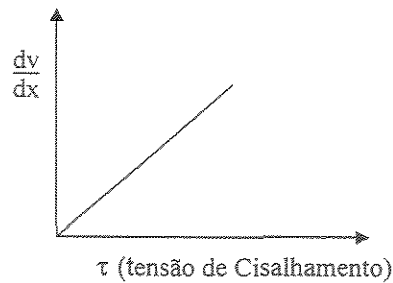


Figura 3 - tensão x deformação

2.2.3. Fluido não-newtoniano

Os fluidos não-newtonianos são aqueles que a tensão de cisalhamento não é proporcional a deformação existente, ou seja, a viscosidade é função da velocidade da deformação, podendo aumentar ou diminuir. Um exemplo comum é a graxa lubrificante.

2.3. Componentes dos Equipamentos

Num vaso agitado (com sistema de agitação), usa-se normalmente os seguintes itens :

Tanque: Normalmente de formato cilíndrico, porém existem casos onde o mesmo possui secção quadrada ou retangular ou até mesmo uma secção de geometria composta, como é o caso de misturadores horizontais. Quando o tanque é pressurizado além da parte cilíndrica, o mesmo possui tampos (calotas) de fechamento para obter-se hermeticidade, estes tampos normalmente são abaulados.

Impelidores: Responsáveis em transmitir o movimento ao fluido.

Moto-redutor: Sistema de acionamento da agitação, normalmente composto por um motor (elétrico ou hidráulico) e um redutor de velocidade, obtendo-se a rotação desejada final (em função do processo).

Castelo: Suportar o conjunto moto-redutor e acomodar o(s) mancal(is) bem como o sistema de vedação do tanque (quando os mesmos são herméticos).

Camisas ou serpentinas: este item se aplica quando há necessidade de se atingir uma temperatura adequada no fluido para realização de um processo ou para obtenção de um produto.

Chicanas: Também chamada de quebra-ondas. São chapas internas que variam a espessura na maioria das aplicações entre 4 a 8 mm e que servem para redirecionar o fluxo, ou seja, facilitar a mistura, troca térmica entre outras finalidades.

Eixo do acionamento: Suportar e/ou dar resistência mecânica ao(s) impelidor(es) auxiliando na transmissão de movimento ao fluido.

Sustentação: A figura 4 representa um vaso suportado por pés tubulares. A sustentação de um tanque deve ser devidamente calculada e ela também pode ser feita por chapas dobradas ou por sapatas laterais presas junto ao corpo cilíndrico.

A seguir alguns destes itens serão abordados novamente com maiores detalhes.

A figura 4, a seguir, mostra um vaso agitado com aquecimento (ou resfriamento) , através da camisa denominada meia-cana. Vale lembrar que a camisa pode ser do tipo integral ou tipo “dimple” , conforme já pré estabelecido na norma ASME VIII.

Outro item de importância para verificação e controle de um vaso agitado e que pode aparecer com relativa frequência num sistema de agitação é o inversor de frequência. Com ele é possível fazer a leitura e variar/modificar valores tais como frequência do motor (como consequência alteração da rotação do agitador), corrente elétrica, leitura do torque de saída do motor entre outros.

O croqui do vaso agitado da figura 4, refere-se a um tanque pressurizado. Ele será hermético caso possua tampos abaulados e selo mecânico como vedação.

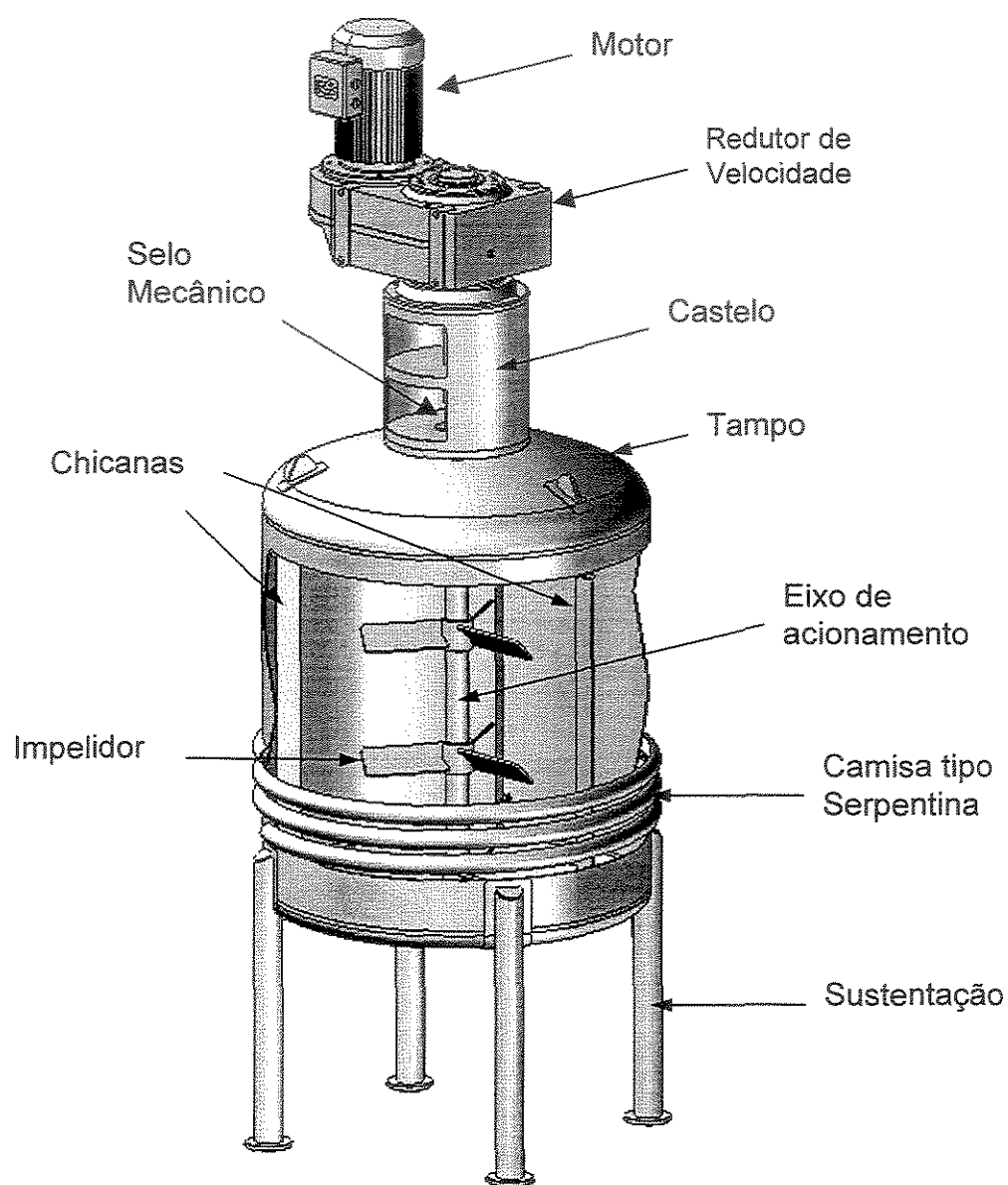


Figura 4 - Ilustração de um tanque com sistema de agitação e camisa

2.4 Tampos

A função dos tampos é suportar a carga interna exigida (pressurizado ou não). Quando há pressão (interna ou externa), eles devem ser dimensionados conforme norma ASME VIII. O fundo abaulado é o mais empregado atualmente em tanques com agitação, porém há uma grande variedade na geometria dos mesmos.

Exemplos dentre os tampos utilizados são mostrados nas figuras 5.1 a 5.4 :

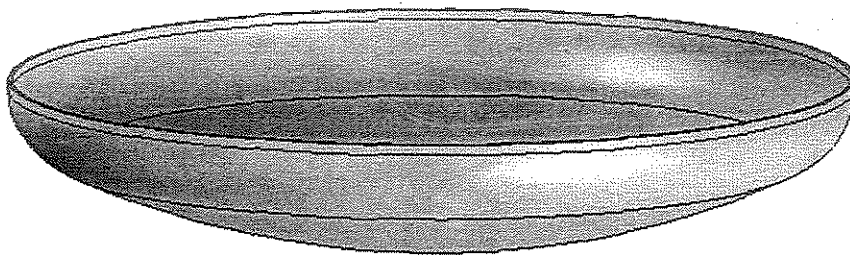


Figura 5.1 - Torisférico ASME 10%

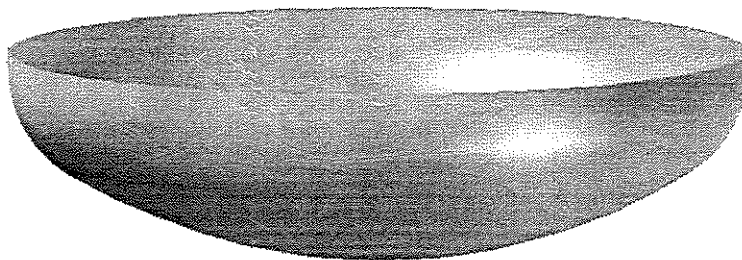


Figura 5.2 - ASME 2:1 – R0,904

A figura 5.3 representa o tampo toricônico. A diferença do toricônico em relação ao cônico são as bordas arredondadas. Por isso ele é mais utilizado na indústria farmacêutica e alimentícia pois facilita a assepsia no tanque.

Uma das aplicações práticas do tampo abaulado reverso, visto na figura 5.4, é quando o sistema de agitação necessita ser no fundo do tanque como no caso da agitação magnética.

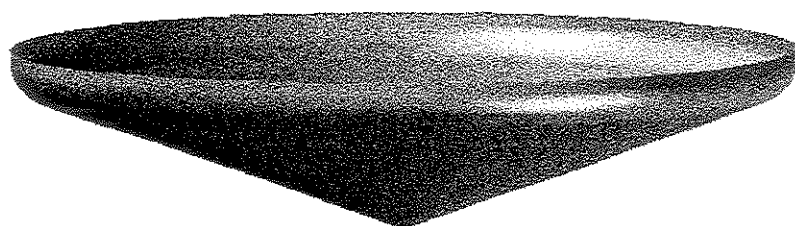


Figura 5.3 – Toricônico

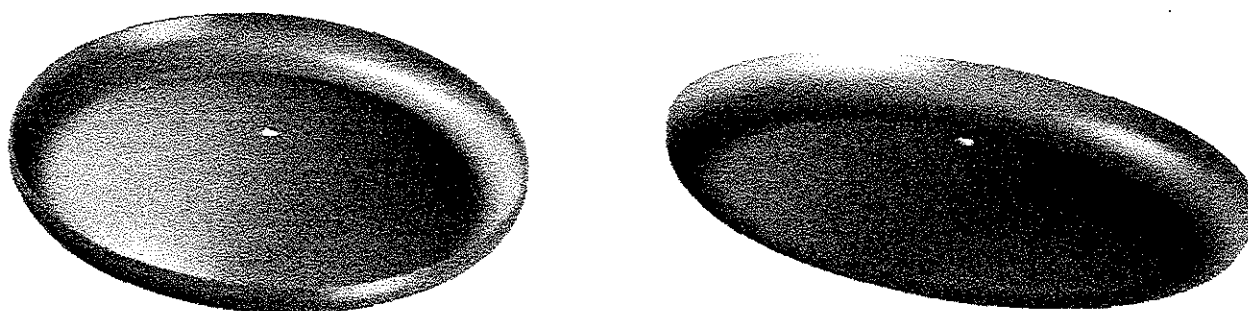


Figura 5.4 – Tampo abaulado Reverso

CAPÍTULO 3

IMPELIDORES

3.1. Introdução

Todo sistema de agitação emprega impelidores, tendo eles “pás” de várias formas e comprimentos, que são fixos a um eixo girante. Este eixo é usualmente colocado a partir do topo do vaso até o fluido a ser misturado.

O impelidor também pode ser chamado como agitador ou misturador. A principal função das pás do impelidor é criar um fluxo ou movimentação do fluido num vaso.

Através de avanços no formato das pás e velocidades de rotação, fabricantes de agitadores esforçam-se para maximizar o fluxo enquanto minimizam a potência consumida.

Os impelidores podem variar de acordo com o regime de mistura ou aplicação, quanto ao regime de mistura ele pode ser laminar ou turbulento.

O impelidor tem atuação importante no sistema de agitação quanto a:

- Troca de calor;
- Transferência de massa;
- Suspensão de sólidos;
- Reações.

Parâmetros para uma melhor escolha entre diversos impelidores disponíveis é apresentado por Dietsche (1998), onde o autor compara o

desempenho de cada um deles em função do volume do vaso, viscosidade, taxa de cisalhamento, entre outros.

3.2. Tipos de Impelidores

Os quatro tipos de impelidores freqüentemente mais utilizados em aplicações de mistura de líquidos são os de pás retas 90°, de pás retas inclinadas a 45°, alta eficiência e o naval, normalmente em regime turbulento ou de transição (não muito viscosos).

3.2.1. Pás Retas a 90°

Cria fluxo predominante radial. A figura 6 mostra um exemplo deste impelidor com 4 pás. Turbinas de fluxo radial montadas em um disco e quando possuem 6 pás são chamadas de turbina Rushton. Os Impelidores de alto cisalhamento também criam fluxos similares.

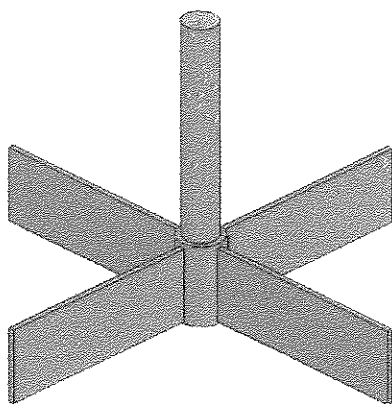


Fig. 6 – Impelidor fluxo radial pás retas 90°.

3.2.2. Pás Retas inclinadas a 45°

O agitador de pás retas a 45°, normalmente possui 4 pás montadas num ângulo de 45° com a horizontal como ilustra a figura 7 abaixo. Cria um fluxo predominante axial, porém, com componente radial.

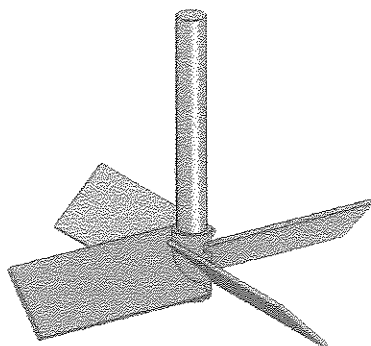


Fig. 7 - Impelidor de pás inclinadas 45°.

3.2.3. Alta Eficiência

O impelidor alta eficiência possui 3 pás a 120°. Segundo estudos de sua geometria, ele produz fluxo primeiramente axial (Fasano,1994),(Myers,1994). Seu desempenho é similar ao impelidor naval. Otimiza troca térmica nas operações. Suas pás são montadas no cubo com ângulo de 30° a 60° em relação à horizontal.

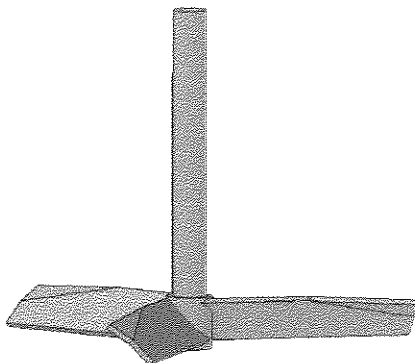


Fig. 8 - Impelidor alta eficiência ou "hidrofoil".

3.2.4. Impelidor tipo hélice naval

Antes de descrevermos o impelidor naval (também chamado de hélice naval), veremos alguns conceitos segundo Mammini,(2003).

A hélice é uma figura geométrica sólida (ver fig. 9), uma espécie de espiral no espaço, um parafuso que está sempre girando.

Três fatores são importantes e definem a hélice: o Diâmetro, Passo e Rotação.

O formato da pá não influi muito, o que realmente vale é o que se convencionou chamar de área de disco, ou seja, a área que a pá da hélice descreve ao girar.

Existem dois tipos de hélices. As primeiras são hélices cujo ângulo no cubo e na ponta da pá é o mesmo. As segundas são as que os ângulos vão mudando conforme se alonga a pá, este último tem rendimento bem superior ao anterior .

Tendo em vista que a hélice gira em um meio líquido, se o ângulo for o mesmo, o líquido na ponta da pá anda mais depressa que próximo ao cubo do eixo, ao passo que se o ângulo for diminuindo na ponta da pá, a velocidade de transito do líquido na pá será a mesma em toda a superfície. Nesse caso o rendimento aumenta significativamente.

A hélice naval transforma o movimento de rotação de um motor em movimento linear (axial), promovendo bombeamento no interior do tanque misturador.

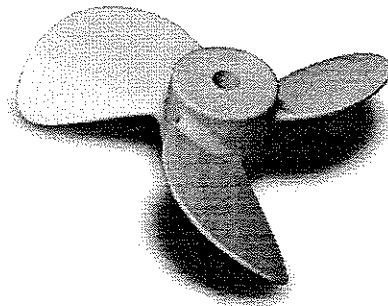


Fig. 9 - Impelidor tipo hélice naval.

3.3. Impelidores para Regime Laminar

3.3.1. Misturadores “Helical Ribbon”

Impelidores tipo “helical ribbon” e âncora são típicos para utilização em regime laminar (altas viscosidades e $Re < 10^3$) para fluidos newtonianos e não-newtonianos, como por exemplo a fabricação de pastas ou pomadas (que dependendo do produto pode ser um ou outro). Trabalham com alta relação diâmetro do impelidor em relação ao diâmetro do tanque (D/T). Este valor está em torno de 0,9 a 0,95. A largura da fita da hélice (ou da âncora) está em torno de 8 a 12% do diâmetro do tanque.

Uma correlação para se estimar a potência consumida para o impelidor “Helical Ribbon” é apresentada por Jayanti (2003) para fluidos viscosos, onde as estimativas foram baseadas em simulações em fluidodinâmica computacional utilizando ferramentas como um programa em CFD (Computacional Fluid Dynamic).

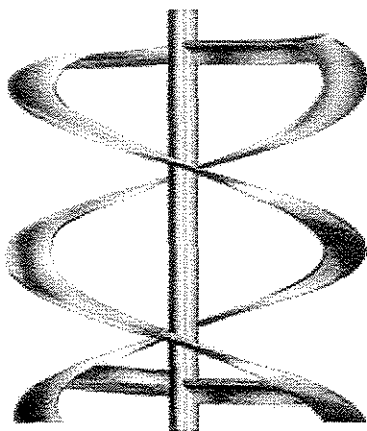


Fig. 10 – Agitador “Helical Ribbon” .

3.3.2. Âncora

O impelidor tipo âncora é ilustrado na figura 11 abaixo, produz fluxo rotacional ou tangencial, como também citado por Uhl & Gray (1966), e que normalmente utilizam raspadores.

Devido a baixa movimentação que ocorre neste regime de mistura não há a necessidade do uso de chicanas.

Os raspadores são peças importantes na fabricação de produtos como cremes e pomadas. Normalmente construídos em teflon, eles têm a finalidade de evitar a “queima” do produto nas paredes do reator.

Fixados sempre à âncora, na maioria dos casos trabalham em rotações que variam na faixa de 10 a 60 rpm.

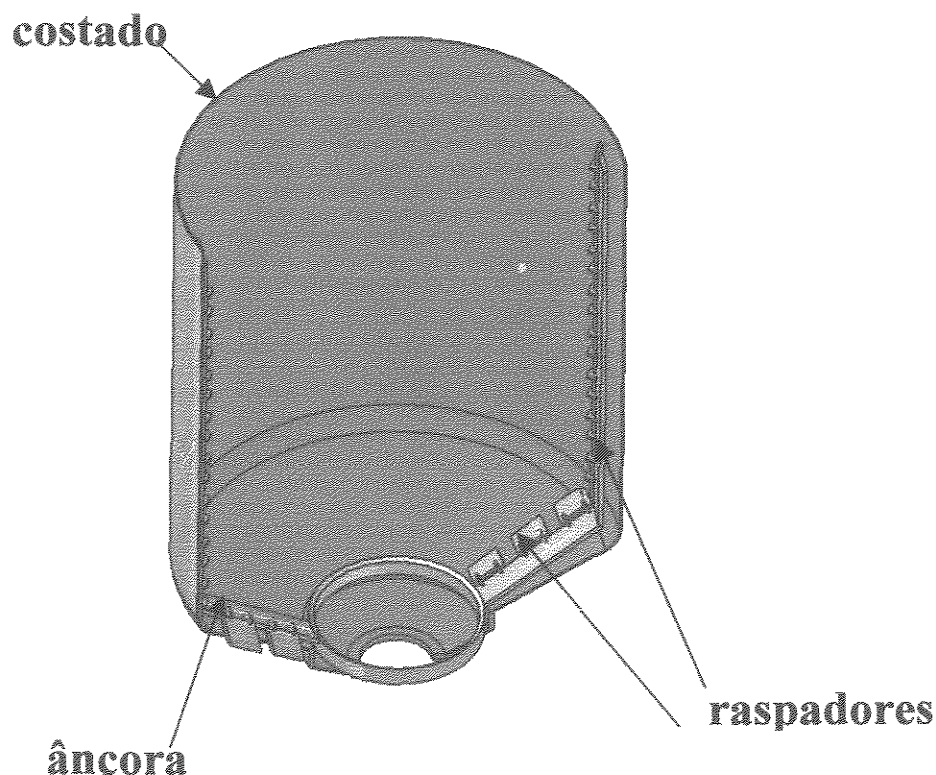


Figura 11 – Impelidor tipo âncora com raspadores empregado em fluidos viscosos (newtonianos ou não-newtonianos).

3.4. Impelidores de Construção Sanitária

3.4.1. Agitador Magnético

Uma das preocupações nas indústrias de biotecnologia e farmacêutica, é a contaminação do produto. A fabricação destes produtos tem sido feita com tanques misturadores de tecnologia convencional, onde se empregam selos mecânicos que há mais de quinze anos tem sido utilizados para apenas controlar vazamentos e não preveni-los.

Em muitas aplicações de processos isto pode ser aceitável, mas o uso de misturadores com tecnologia desenvolvida sem selos está se tornando a escolha preferida (Gambrill,1996).

Em misturadores que executam sua função com agitador magnético não se emprega a tecnologia convencional de selagem, pois não há uma conexão mecânica entre o acionamento do misturador e a montagem do agitador dentro do tanque, então, com isso, elimina-se o selo mecânico.

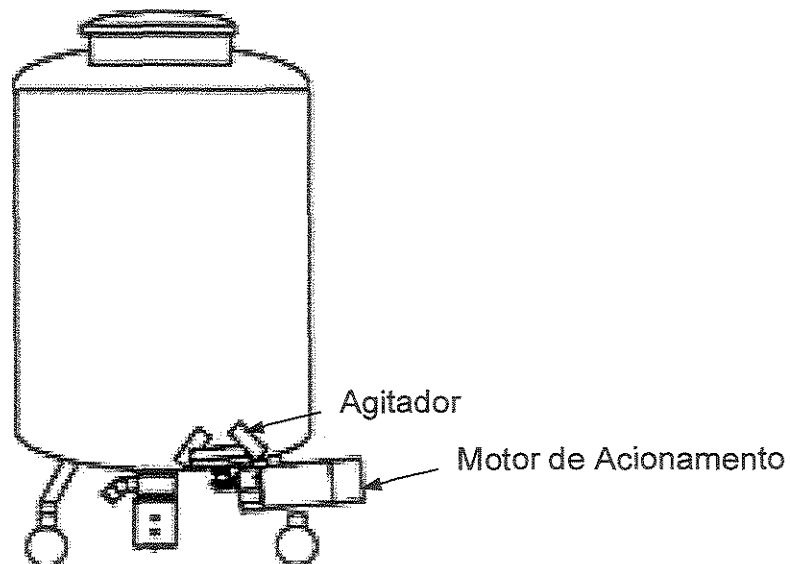


Figura 12 - Esquema de um agitador magnético montado no fundo do tanque.

Num tanque com agitação magnética a conexão é feita através de acoplamento magnético fixos um no acionamento do misturador e outro no agitador, mantendo uma selagem hermética no tanque misturador. Esta aplicação é feita onde as maiores preocupações estão voltadas para a segurança e saúde.

Considerações de projeto para estes agitadores e resultados sobre o grau de limpeza que eles oferecem são apresentados (Gambrill,1996). Onde é feita uma comparação entre o agitador magnético que utiliza mancal de cerâmica (que é um sistema convencional que há mais de vinte anos é utilizado), e outro que utiliza mancal de esferas, denominado “híbrido”.

Neste último as ligas que o compõem combinados com outros fatores de projeto citados pelo autor permitem uma maior sanitariedade do processo quando comparado com o convencional de cerâmica.

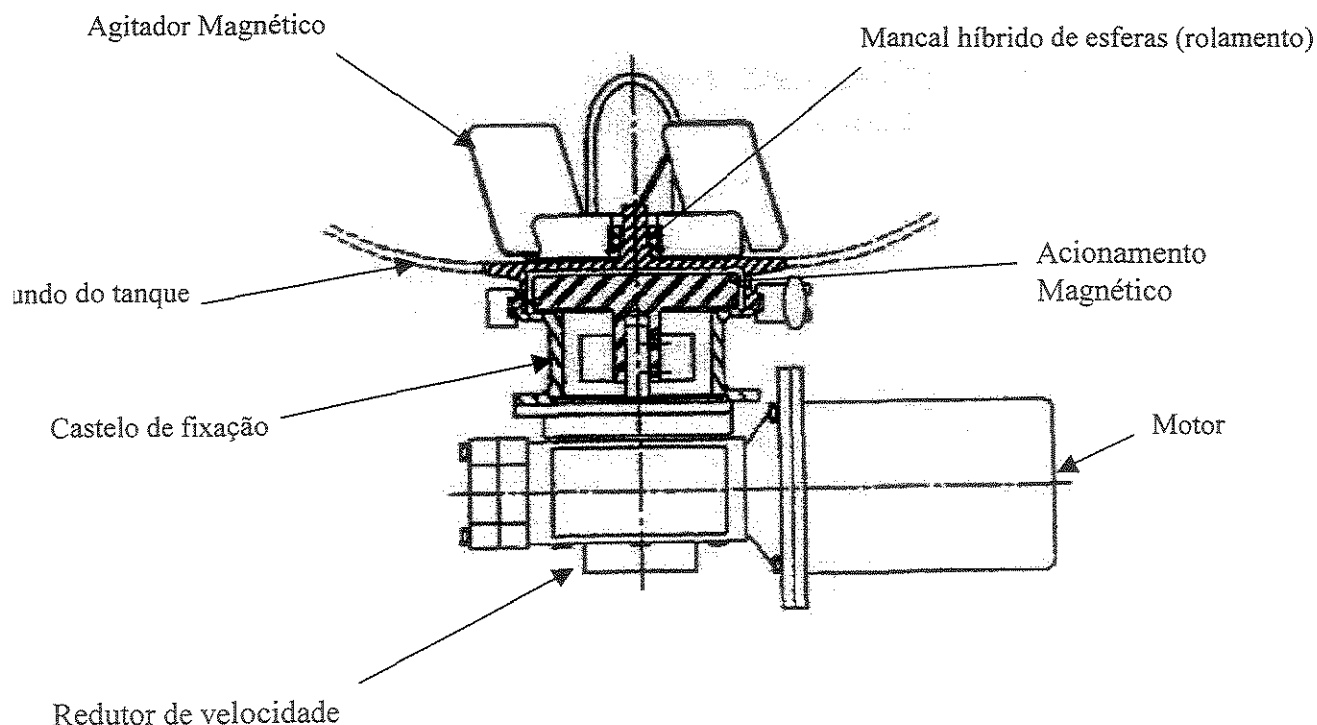


Figura 13 – Sistema de agitação que emprega agitador magnético.

Umas das limitações do agitador magnético é que o mesmo trabalha com rotação de 100 a 200 rpm pois acima disso o agitador pode desacoplar, efeito no qual pode causar danos para o impelidor ou ao tanque.

3.4.2. Agitador PolyMixer® (Asepco,2004)

Um impelidor que também não emprega o uso de selo mecânico como vedação, sendo uma tecnologia relativamente nova, é divulgada pela Asepco e é o agitador denominado PolyMixer que emprega mancais em carbeto de silicone e carbeto de tungstênio (são considerados sanitários) e mostra ser uma alternativa de uso para a indústria.

Segundo o fabricante, a rotação de trabalho deste impelidor está acima de 1000 rpm e opera em tanques com capacidade de até 20000 litros, com flexibilidade nos tipos de agitadores utilizados.

Estudos devem ser feitos quanto à melhor eficiência de seu uso nas áreas de biotecnologia e farmacêutica quando comparado com o agitador magnético citado no item anterior, observando itens de sanitariedade e limpeza, entre outros aspectos, pois em altas rotações há mais facilidade de desprendimento de partículas das partes em atrito do sistema.

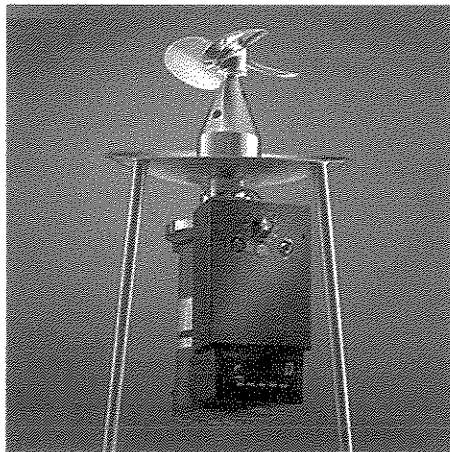


Figura 14 - Impelidor tipo “PolyMixer®”.

3.5. Impelidor Alto Cisalhamento

3.5.1. Dispensor ou impelidor dente de serra

O impelidor é um disco com dentes angulares próximos à periferia (ver figura 15) , o que faz dele um impelidor de alto cisalhamento (cortante) . A forma e a posição dos dentes variam de acordo com cada fabricante.

O impelidor é utilizado principalmente na dispersão em alta velocidade para pigmentos de tintas, mas atualmente tem sido usado também para fabricação de produtos nas áreas de cosméticos, alimentícia e farmacêutica.

Um exemplo prático de seu uso na fabricação de tintas e parâmetros de projeto dimensional para esta finalidade, é a produção de pigmentos “Stir In”, onde a velocidade periférica do agitador para dispersão deve estar entre 17 a 22 m/s e seu diâmetro deve estar de 0,3 a 0,5 vezes o diâmetro do tanque.

Segundo Dietsche (1998), a resistência de fluxo do fluido aumenta efetivamente a característica cortante do agitador dente de serra. Normalmente, é

melhor aplicado em fluidos relativamente viscosos, ou seja, entre 10.000 e 50.000 cP e têm devido à alta viscosidade, limitações devido ao seu alto consumo de potência. De um modo geral, utiliza-se em tanques com capacidade útil de até 3700 L (1000 gal.).

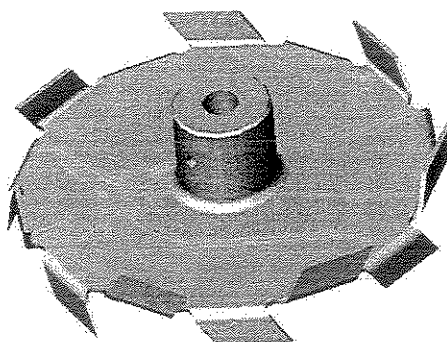


Figura 15 – Dispensor dente de serra.

3.6. Características individuais dos impelidores

Antes de escolher um agitador em função da aplicação, deve-se conhecer a capacidade de bombeamento e cisalhamento que cada um pode proporcionar, devido a sua forma geométrica de construção.

As Figuras 16 e 17 demonstram estas características para alguns destes tipos de agitadores.

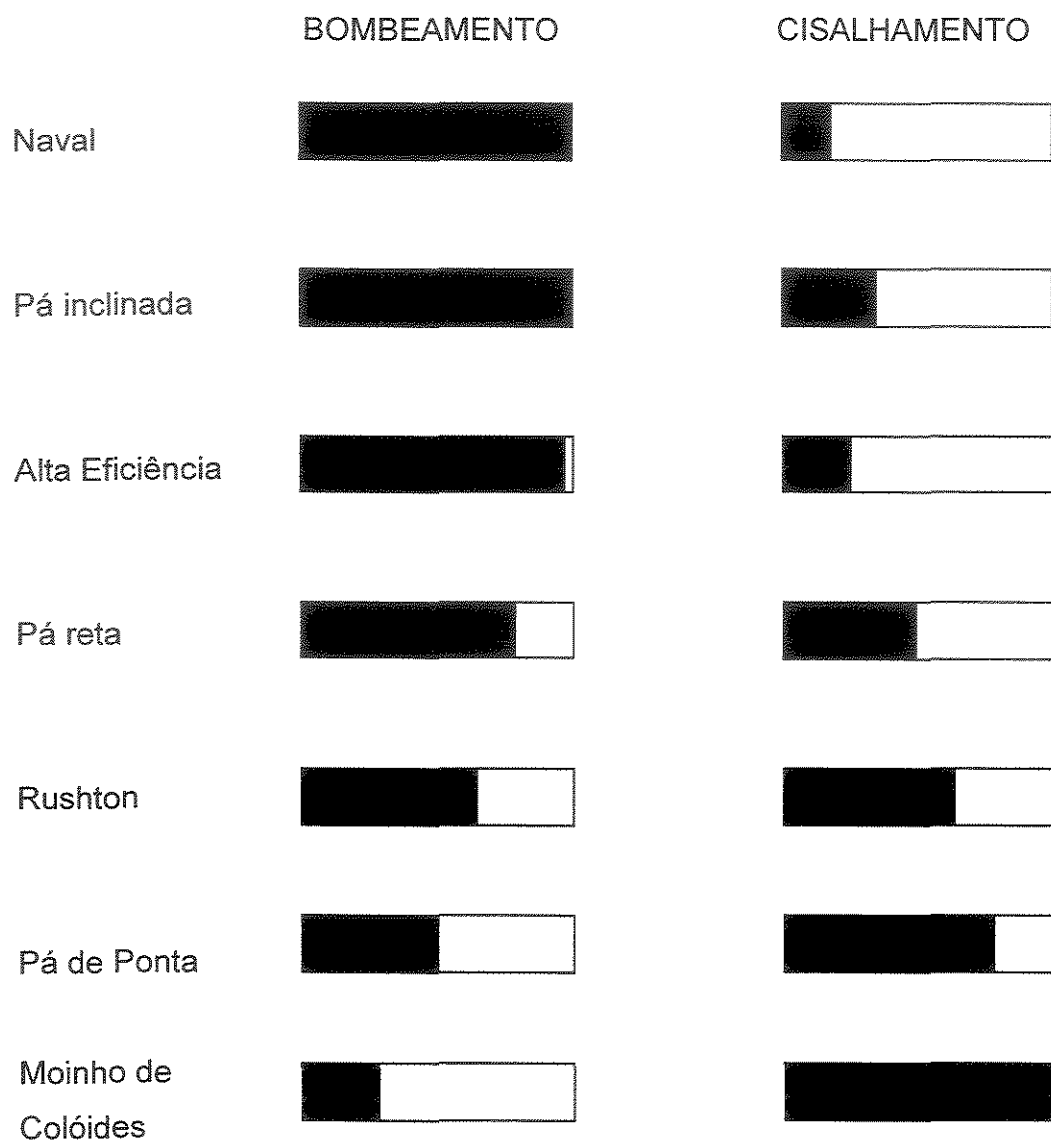
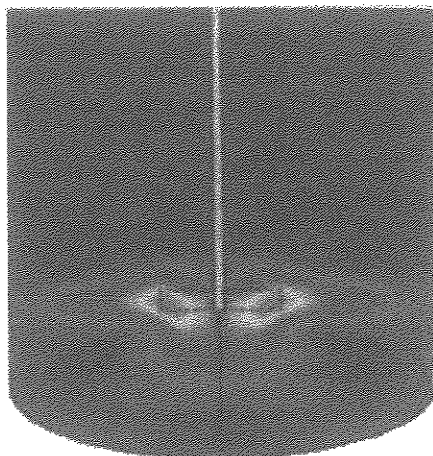


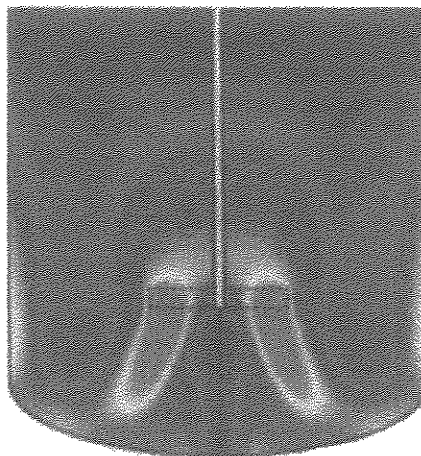
Figura 16 - Diagrama de Impelidores com seus respectivos níveis de fluxo bombeamento e cisalhamento baseado em Tatterson (1994) e Fasano et al (1994).



Pás Retas



**Pás Inclínadas
"Pitched Blade"**



Alta Eficiência

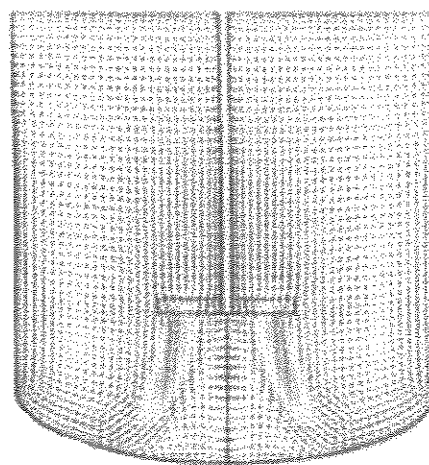
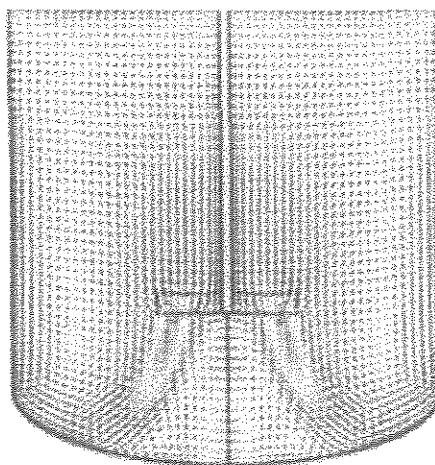
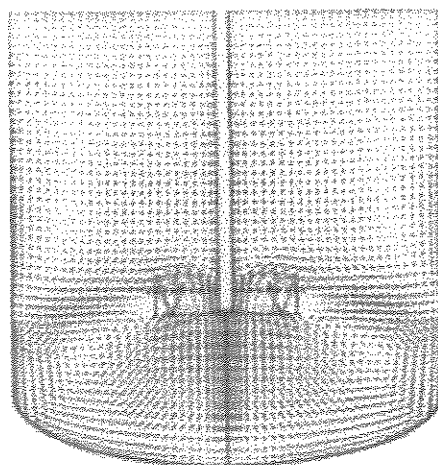
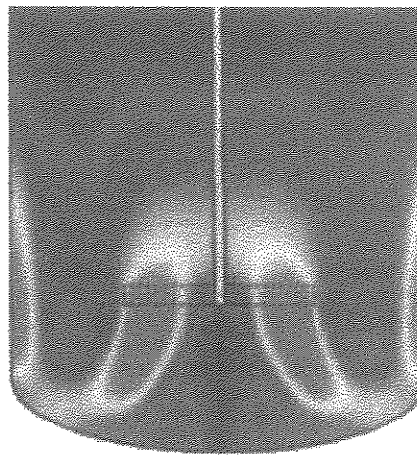


Figura 17 - Tipos de Fluxo (da esquerda para direita), Radial, Axial e Médio (Dickey,2004).

Velocidade do fluido



3.7. CHICANAS

3.7.1. Introdução

Myers et al (2002) relatam a importância do uso de chicanas em vasos agitados, tendo as mesmas como primeiro propósito converter movimento circular em fluxo axial para atender os objetivos de processo.

Um exemplo simples desta definição é pensar sobre a mistura num copo de café: A maioria da mistura ocorre quando para-se a colher após ter mexido o líquido ou quando é invertida a direção de giro da colher.

Normalmente o uso de chicanas é para obter fluxo axial, tipicamente utilizadas para mistura e na suspensão de sólidos, e para fluxo radial, usadas para dispersão de gás. Entretanto, o uso de chicanas têm também outros efeitos, como minimizar vórtices e melhorar a estabilidade mecânica do sistema.

A figura 18 abaixo mostra a diferença entre usar ou não chicanas para líquidos com baixas viscosidades com presença de sólidos.

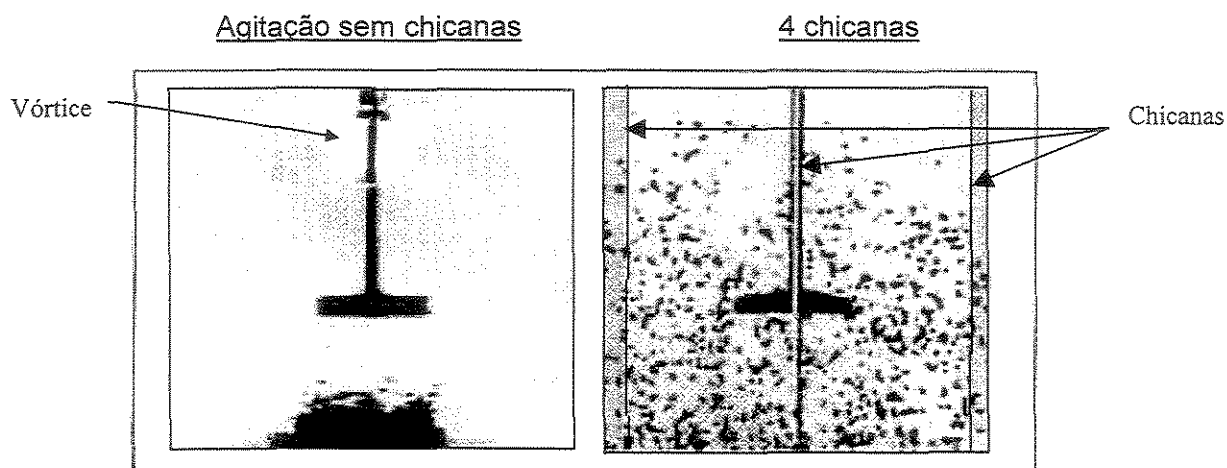


Figura 18 - Comparação da agitação com e sem chicanas utilizando impelidor pá inclinada (fluxo axial) (Myers et al,2002).

Na figura 18, segundo os autores, a única diferença entre os experimentos é a presença de chicanas. Entretanto, a presença das mesmas eleva a potência consumida no sistema.

Verifica-se a deposição de sólidos no fundo do tanque quando não há chicanas, onde o fluido realiza movimento circular ou rotacional, com o posterior aparecimento de vórtice, sendo na maioria dos casos não desejado.

3.7.2. Desvantagens do Vórtice

- ✓ Incorporação de ar, onde em determinados processos haverá formação indesejada de espuma, bem como prejudicando o controle eletrônico (sensores, medidores de nível, etc..) de operação.
- ✓ Quando atinge o impelidor inferior pode ocasionar vibração no eixo (perda da estabilidade mecânica).
- ✓ O cisalhamento é baixo entre o impelidor e o fluido devido ao movimento ser circular ou girante.
- ✓ Transbordamento de material para fora do tanque.

Parâmetros de projeto para o emprego de chicanas em função do volume do tanque e viscosidade são citados na tabela 2, abaixo:

Tabela 2 - Uso de Chicanas - Critério de projeto (Hicks et al, 1976).

Volume (galões)	Viscosidade (cP)	Parâmetro	Largura
< 1000	< 2500	4 a 90°	T/12
< 1000	>2500	não	
>1000	<5000	4 a 90°	T/12
>1000	>5000	não	

CAPÍTULO 4

NÍVEL DE AGITAÇÃO

4.1. Velocidade média

O nível de agitação (NA) é um dos critérios utilizados para projeto de um sistema de agitação. Sua escala varia de 1 a 10, onde o valor 1 representa nível baixo e 10 um nível alto de agitação (ver tabela 3). Hicks (1976) definiu NA através de experimentos feitos num impelidor de pás inclinadas. Esta escala de agitação é baseada na velocidade média do fluido no tanque (V_m) que é dada por:

$$V_M = \frac{Q_p}{A_v} \quad (2)$$

onde Q_p (taxa de bombeamento em m^3/s) é obtido do número de bombeamento e A_v (Área da secção transversal do vaso em m^2).

4.2. Número de bombeamento

O número de bombeamento (N_q) é um valor adimensional e tem grande importância no critério de seleção e definição de um sistema de agitação. Seu valor é função do tipo de impelidor, da relação diâmetro do impelidor pelo diâmetro do tanque (D/T) e o número de Reynolds. Este valor normalmente é obtido através de dados disponíveis nas literaturas. As curvas mostradas na figura 19 referem-se ao impelidor de alta eficiência, para diversos valores de D/T .

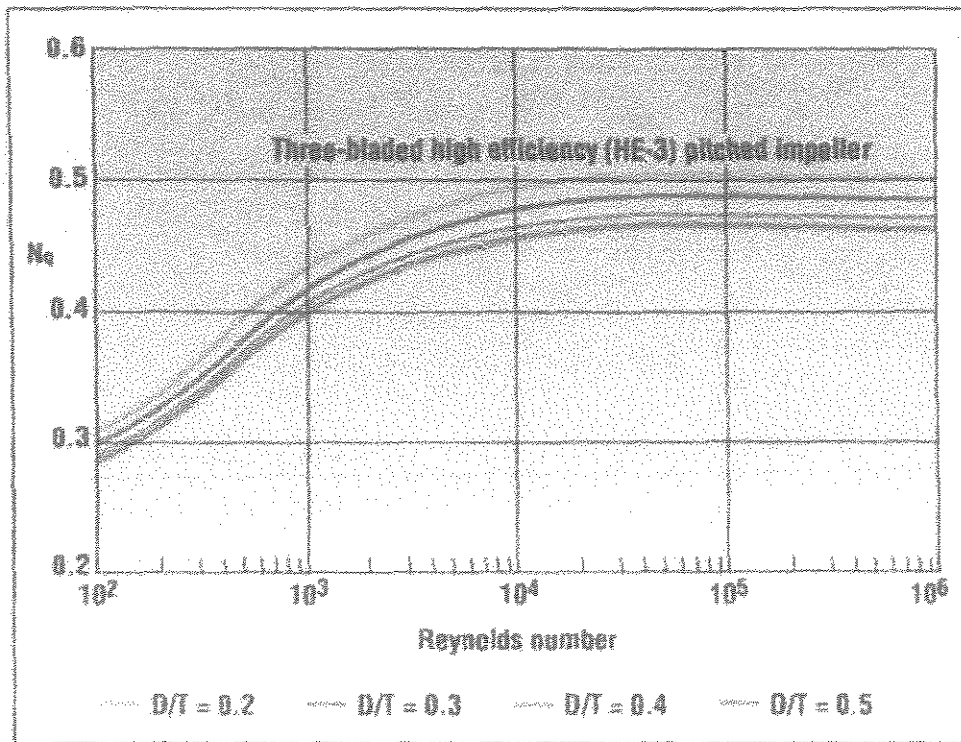


Figura 19 - Número de bombeamento x Número de Reynolds (Fasano, 1994).

4.3. Determinação do Nível (ou intensidade) de Agitação

O Nível de Agitação (NA) é obtido baseado no valor de N_q através das curvas conhecidas, do valor da rotação do sistema (N) e o diâmetro do impelidor (D), com isso obtém-se o valor da taxa de bombeamento:

$$Q_P = N_q N D^3 \quad (3)$$

Para obter-se a velocidade média do fluido no tanque (V_M) substitui-se o valor de Q_P na eq. 2.

Então, o nível de agitação poderá ser obtido por:

$$NA = 32,8V_M \quad (4)$$

4.4. Método para seleção do misturador (Chemineer,2004)

Tabela 3 – Escala de Agitação

Escala de Mistura (Nível de Agitação)	Descrição
1-2	Agitação e mistura considerada Fraca (ou Mínima). Produce baixa movimentação do fluido na superfície.
3-5	Mistura moderada (ou intermediária) de líquidos miscíveis quando a diferença de densidade entre eles é menor que 0,6. Produz ondulações na superfície em líquidos com viscosidades próximas à da água.
6-8	Agitação Moderada a vigorosa para mistura uniforme de líquidos miscíveis quando a diferença de densidade entre eles é menor que 0,6. Produz ondulações na superfície em líquidos com baixas viscosidades.
9-10	Agitação muito vigorosa para mistura uniforme de líquidos miscíveis quando a diferença de densidade entre eles é menor que 1,0. Produz movimentação violenta na superfície em baixas viscosidades.

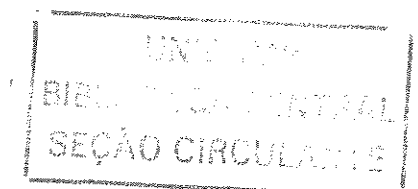


Tabela 4 – Definições para agitação com sólidos (Chemineer,2004).

Suspensão de Sólidos	
Intensidade	Definição
Movimentação de sólidos	Há sólidos no fundo do tanque, mas permanecem em movimento.
Suspensão Completa	Não há sólidos depositados na base do vaso por um significativo período de tempo.
Suspensão Uniforme	Distribuição homogênea de sólidos por todo o volume de líquido.

Para alguns tipos de impelidores, como o naval, alta eficiência e “Rushton” podemos fazer uma aproximação para comparar e relacionar a velocidade na ponta da pá (V_p) com o grau de agitação, conforme tabela 5.

Tabela 5 – Relação de V_p x parâmetros de agitação.

Grau de agitação	Velocidade periférica (vp) m/s	Potência por unidade de volume(P/V)(W/m³)
Baixo	3,25	750
Médio	3,26 até 4	750 até 1500
Alto	acima de 4	acima de 1500

4.5. Parâmetros Geométricos na Agitação

As relações de altura de líquido pelo diâmetro do tanque (Z/T) mostradas na tabela 6 servem para direcionar um projeto de um sistema de agitação para um melhor desempenho. A tabela 6 indica valores máximos em função do Número de Reynolds e do tipo de impelidor.

Tabela 6 - Valores máximos permitidos (recomendados) de Z/T , dependendo das condições dos agitadores sendo simples ou duplo (FASANO et al 1994).

Valores máximos permitidos Z/T						
Faixa de Re	Impelidor alta eficiência		Impelidor 4 pás 45°		Impelidor 4 pás planas ou 6 pás(Rushton)	
	Único	Duplo	Único	Duplo	Único	Duplo
10 -100	0,9	1,7	0,8	1,5	0,6	1,2
100 -1000	1,3	2,1	0,9	1,6	0,6	1,2
1000 -10000	1,4	2,3	1,1	1,8	0,7	1,4
>10000	1,5	2,4	1,2	1,9	0,8	1,6
Para impelidor único: $Z/6 \leq C \leq Z/2$; Padrão $C = Z/3$ Para dois impelidores: $Z/8 \leq C \leq 3Z/8$; $Z/2 \leq C + S \leq 3Z/4$; Padrão $C = Z/3$, $C+S = 2Z/3$						

Onde, $Z = H$: altura de líquido

A figura 20 mostra parâmetros de projeto e nomenclatura habitual para tanques agitados, com presença de chicanas e com fundo abaulado (utilizado na maioria dos casos).

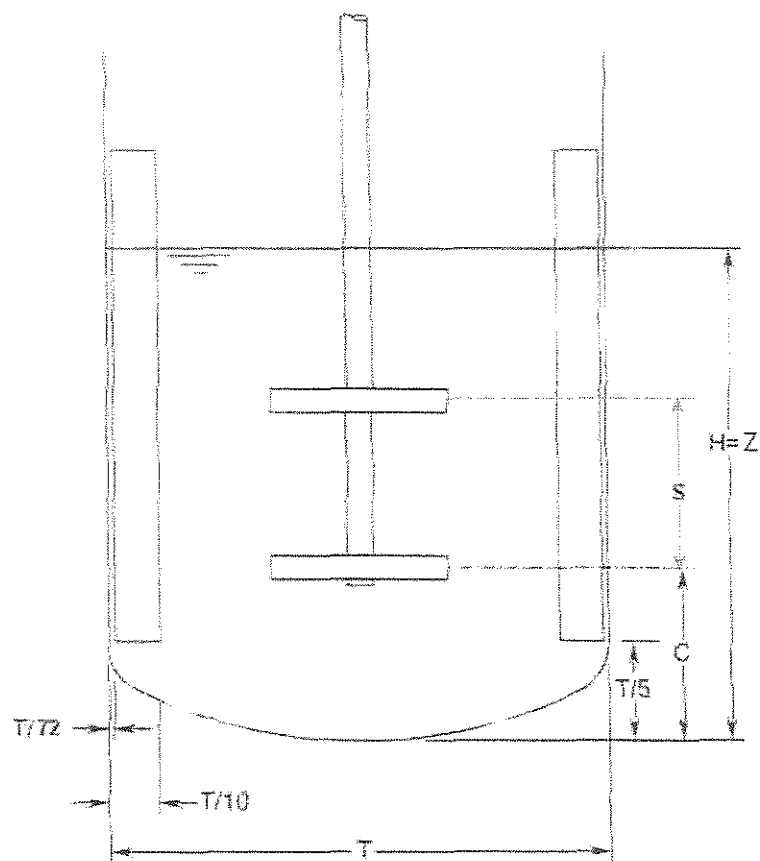


Figura 20 - Parâmetros Geométricos.

Capítulo 5

EIXO DO ACIONAMENTO

5.1. Requerimentos Mecânicos

O eixo é um componente vital de um agitador e freqüentemente limita o desempenho mecânico do mesmo. A maior função do eixo do agitador é de transmitir o torque do acionamento para o impelidor. Em adição à transmissão do torque, o eixo sofre flexão, e se não estiver suficientemente ou rigidamente suportado, ele pode vibrar excessivamente e causar desconforto para as pessoas ou danificar o equipamento. Então, ele deverá ser verificado para tensões de flexão e torção combinados, deflexão e velocidade crítica. Deverá ser selecionado a atender os critérios limitantes em cada situação.

Inadequações nestes critérios pode resultar na falha do eixo por tensões elevadas, falha na selagem devido à excessiva flexão do eixo, ou danificação nos mancais devido ao desgaste ou impacto.

5.2. Tensão de Torção e Flexão

Tensões de torção e cisalhantes podem ser causadas pela ação do acionamento do motor, pelas resistências inerciais e viscosas do fluido.

Desbalanceamento de forças hidráulicas gerada por construção assimétrica de impelidores e chicanas ou devido a turbulência do líquido podem causar flexões (cíclicas), pois atuam lateralmente sobre o eixo.

Forças centrífugas formam-se quando o eixo está fora da especificação do desbalanceamento máximo permissível.

5.3. Velocidades Críticas

Como a velocidade de qualquer eixo rotativo incluindo-se um eixo de agitador é elevada, ele pode tender a movimentar ou vibrar violentamente na direção transversal. Estas vibrações aumentam ambas as tensões, de torção e flexão no equipamento e na deflexão do eixo. Elas podem causar sérios danos como uma aceleração do desgaste ou quebra por fadiga das partes rotativas e suportes.

Em determinadas velocidades, a vibração estará em ressonância com a frequência de vibração natural do sistema. A estas velocidades, chamadas velocidades críticas, as vibrações podem causar completa e rápida destruição do equipamento.

As velocidades críticas correspondem com às velocidades nas quais a força centrífuga e o centro deslocado da massa do eixo exatamente igualam-se nas forças de deflexão sobre ele. O eixo vibra porque as forças centrífugas mudam a direção rapidamente com o giro do eixo.

Vibrações no eixo também podem ser causadas por forças periódicas externas como forças que podem surgir próximo (junto) a um compressor, centrífuga, turbina, outro agitador ou outro equipamento. As vibrações ocorrem na frequência da força de excitação indiferente à frequência natural do agitador, mas se as duas frequências coincidirem as das forças resultantes podem tornar-se muito destrutivas.

Visto que não é sempre possível antecipar ou eliminar forças de excitação externa, a mais prática correção é a isolação do agitador pelo uso de “dampers” (ou amortecedores de impactos) no agitador ou no suporte do reator ou no suporte do equipamento.

Vibrações livres, em contrapartida, ocorrem quando o sistema tem forças periódicas, como um desbalanceamento hidráulico ou forças de acionamento, que são geradas dentro do sistema.

Isto significa que o agitador nunca deve operar dentro de $\pm 30\%$ da velocidade crítica. A velocidade de operação do eixo deve estar suficientemente longe da frequência natural do sistema para prevenir deflexões que excedam a tensão de escoamento do material.

Segundo Ramsey e Zoller (1976) o eixo do agitador não deve estar provido de um “run-out” maior que 0,003 in/ft.

A utilização de estabilizadores podem minimizar o efeito da velocidade, porém, a rotação de operação do eixo não deve ultrapassar a 80% da rotação crítica. Um impelidor tipo pás retas 45° montado com estabilizadores é mostrado na figura 21 a seguir.

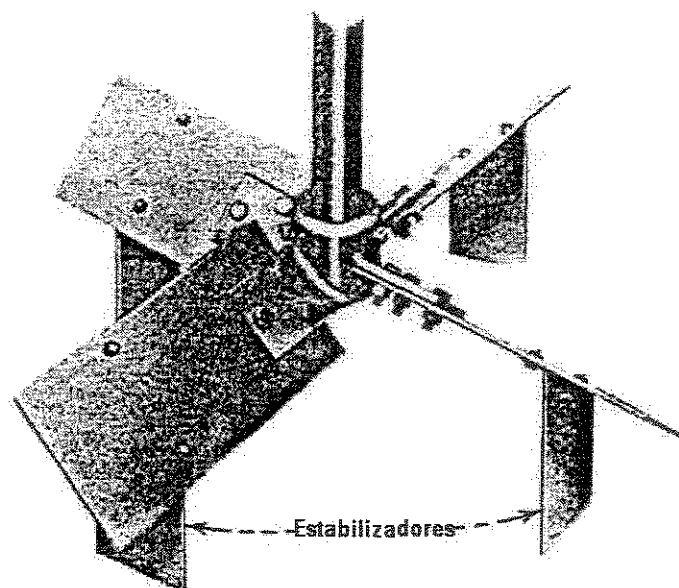


Figura 21- Pás montadas com estabilizadores

Capítulo 6

Materiais e Métodos

6.1. Introdução

Muitas empresas, estudantes e técnicos da área de processos (onde inclui-se a agitação de fluidos) não dispõem de capital para ser empregado na aquisição das licenças dos softwares disponíveis no mercado atualmente.

Programas computacionais que executam cálculos de dimensionamentos em vasos agitados, possuem deficiências em vários aspectos sendo que a medida em que elas tendem a diminuir, os custos destes softwares tendem a aumentar na mesma proporção, impossibilitando cada vez mais a aquisição por uma grande parte de pessoas interessadas nesta área.

O Método de Cálculo apresentado em Excel executa cálculos para estimar a potência consumida do agitador de alta eficiência e calcula o valor do diâmetro do eixo maciço e eixo tubular oco (vazado) para atender torque, flexo-torção e rotação crítica, para eixos em balanço, conforme equações da literatura, aqui descritas.

6.2. Critérios de seleção do acionamento

Agitador Mecânico:

Ao se dimensionar um sistema de agitação é importante a consideração de que a energia cinética fornecida pelo impelidor seja suficiente para induzir correntes que atinjam as partes mais remotas do tanque.

6.2.1. Adimensionais

A seleção do acionamento do sistema de agitação pode ser feita através do torque requerido pelo fluido ou da potência consumida pelo mesmo.

Os dois números adimensionais característicos de um certo sistema considerado e que estão correlacionados com o cálculo da potência dissipada (ou consumida) pelo agitador, são:

$$\text{Número de Reynolds: } Re = \frac{\rho \cdot n \cdot D^2}{\mu} \quad (5)$$

$$\text{Número de Froude: } Fr = \frac{n^2 \cdot D^2}{g} \quad (6)$$

Outros adimensionais usados em agitação de fluidos, estão descritos abaixo (Dickey, 1976):

$$\text{Tempo de mistura} \quad t_b^* = t_b \cdot N \quad (7)$$

$$\text{Número de Peclet} \quad N_{pe} = \rho C_p N D^2 / k \quad (8)$$

$$\text{Número de Prandtl} \quad N_{pr} = C_p \mu / k \quad (9)$$

$$\text{Número de bombeamento} \quad N_Q = Q_P / N D^3 \quad (10)$$

$$\text{Número de potência} \quad N_P = P g_C / \rho N^3 D^5 \quad (11)$$

6.3. Cálculo da Potência Consumida pelo agitador

$$\text{Pot. Cons.} = N_p \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5 \quad (12)$$

$$N_p = f(\text{Re})$$

N_p : número de potência (função da geometria do impelidor);

ρ : massa específica;

N : rotação do eixo árvore;

D : diâmetro do impelidor.

Regimes de mistura

Quanto ao regime de mistura podemos classificá-los em:

laminar: $\text{Re} < 10$

transição: $\text{Re} > 10$ e $< 10^4$

turbulento: $\text{Re} > 10^4$

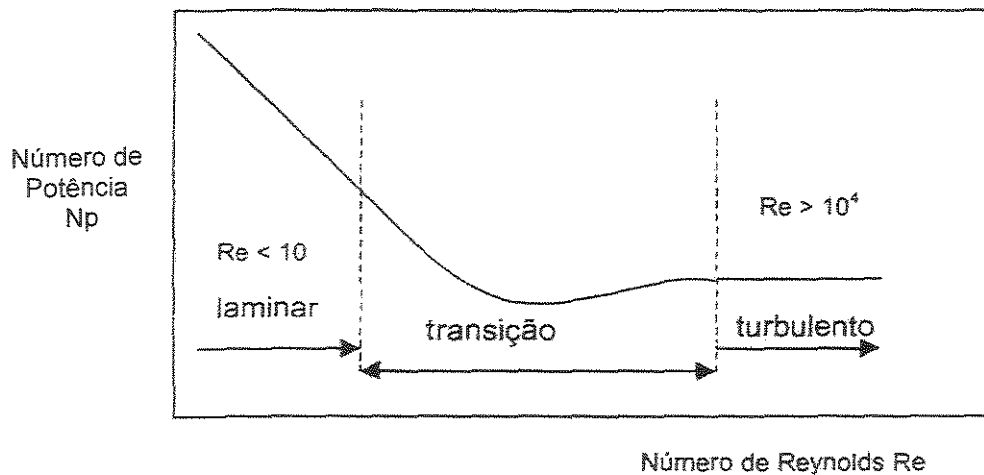


Figura 22 – Característica da curva de Potência

6.4. Curvas de Potência

As curvas de potência variam de acordo com a geometria e o tipo do impelidor. Um exemplo é ilustrado na figura 23, onde o impelidor de alta eficiência, para um mesmo número de Reynolds, têm um N_p menor, que o faz consumir menor valor de potência, porém, os fluxos de cada um, apesar de muito parecidos (axial) possuem pequenas divergências.

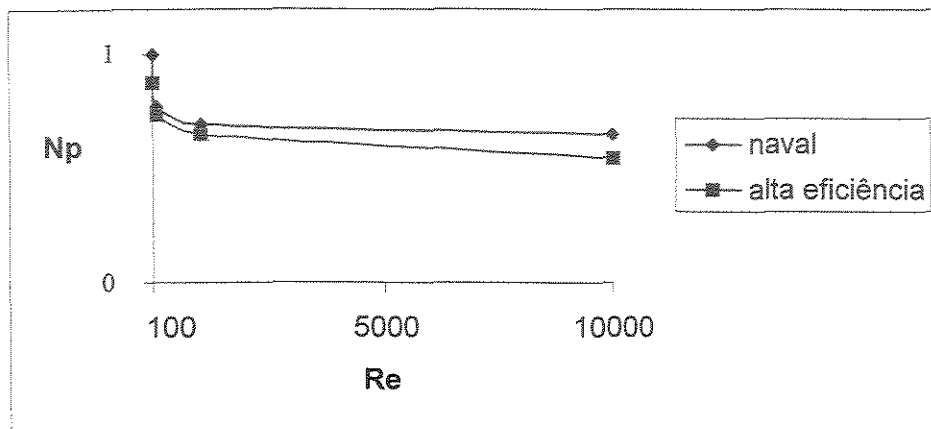


Figura 23 - Comparação das curvas de potência do impelidor naval x alta eficiência.

6.5. Cálculo do diâmetro do eixo do agitador

Após calculada a potência de um impelidor de alta eficiência, o método insere este valor automaticamente para definição do diâmetro do eixo, porém, quando é conhecido o valor da potência, o programa permite ao usuário que se insira este valor.

O cálculo do diâmetro do eixo para solicitações de torção e flexão combinados é feito com base no equacionamento da Resistência dos Materiais (Shigley, 1984) e para rotação crítica no procedimento proposto por (Uhl & Gray, 1966).

Para eixo tubular Oco (Vazado) temos:

6.5.1. Cálculo para a Torção e Flexão

A equação 13 estabelece a tensão máxima (compressão ou tração) para o momento fletor.

$$\sigma_{xx} = \frac{M_f c}{I} \quad (13)$$

Onde a distancia do eixo neutro à fibra mais afastada (c) do eixo é:

$$c = D_e / 2 \quad (14)$$

D_e : Diâmetro externo do eixo

I : Momento de Inércia

O Momento de Inércia (I) para eixo oco é dado como:

$$I = \frac{\pi(D_e^4 - d^4)}{64} \quad (15)$$

d: diâmetro interno do eixo.

Tensão devido à Torção

$$\tau_{xy} = \frac{M_t r}{J} \quad (16)$$

Raio da superfície (r)

$$r = D_e / 2 \quad (17)$$

Onde o momento de Inércia polar da área (J) para eixo tubular é:

$$J = \frac{\pi(D_e^4 - d^4)}{32} \quad (18)$$

Após calculada a potência conforme a equação 12 ou digitado o valor (se conhecido), o Torque (ou momento torçor) é encontrado como:

$$M_t = \frac{P}{2\pi N} \quad (19)$$

N: rotação do agitador

Considerando condição mais crítica que é a de travamento do eixo, a força no agitador se dá pela seguinte equação:

$$F_f = \frac{M_t}{0,75.R} \quad (20)$$

Momento Fletor causado no eixo :

$$M_f = F_f \cdot l_e \quad (21)$$

Utilizando o círculo de Mohr, pode-se encontrar a tensão cisalhante máxima:

$$\tau_{\text{máx}} = \left[\left(\frac{\sigma_x}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

Substituindo os valores das tensões, a equação final para tensão cisalhante máxima fica:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{16}{\pi(D_e^4 - d^4)} (M_f^2 + M_T^2)^{1/2} \quad (23)$$

A teoria da tensão cisalhante máxima, para casos de falha estática, estabelece que :

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{S_e}{2n} \quad (24)$$

Para eixo tubular vazado, utilizando-se a teoria da energia de distorção conduz a:

$$(D_e^4 - d^4) = \frac{32n(M_f^2 + M_r^2)^{\frac{1}{2}}}{\pi S_e} \quad (25)$$

n: fator de segurança.

E para eixo maciço temos:

$$d = \left[\left(\frac{32n}{\pi S_e} \right) \left(M_f^2 + \frac{3M_r^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (26)$$

6.5.2. Cálculo do diâmetro do eixo para Rotação Crítica

As fórmulas utilizadas no cálculo para estimar rotação crítica no sistema, segundo Uhl e Gray (1966) estão descritas a seguir.

A primeira velocidade crítica pode ser calculada da relação que existe entre a deflexão estática e a constante de mola num sistema elástico (o eixo e suportes).

Esta relação pode ser derivada da equação diferencial que compara força elástica restante do eixo (sem amortecimento) com a resistência inercial do impelidor e eixo.

Para uma massa, m , na ponta de um eixo em balanço com peso desprezível com uma constante de mola, k , a equação é:

$$m \frac{d^2 Y}{dt^2} + k g_c Y = 0 \quad (27)$$

Uma solução para esta equação é:

$$Y = Y_0 \cos \left[(k g_c / m)^{\frac{1}{2}} t \right] + V_0 (m / k g_c)^{\frac{1}{2}} \sin \left[(k g_c / m)^{\frac{1}{2}} t \right] \quad (28)$$

onde Y e Y_0 = deslocamentos nos tempos t e 0 ,

V_0 = Velocidade em $t = 0$,

$$\text{frequência natural de vibração: } \omega_c = (K g_c / m)^{1/2} \quad (29)$$

Cada deflexão, δ , tem uma força, F , associada com ela de acordo com a relação:

$$F = k \delta \quad (30)$$

Se F é a força da gravidade atuando sobre a massa, m :

$$F = mg/g_c \quad (31)$$

e

$$mg/g_c = k \delta \quad (32)$$

Rearranjando os termos:

$$K/g_c / m = g / \delta \quad (33)$$

E então,

$$\omega^2 = g / \delta \quad (34)$$

ou

$$N_c = \frac{60}{2\pi} \left(\frac{g}{\delta} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{187,7}{\sqrt{\delta}} \quad (35)$$

Para um eixo em balanço peso desprezível e com carregamento na extremidade, segundo Roark (1954) temos:

$$\delta = WL^3/3EI \quad (36)$$

onde:

E = módulo de elasticidade do material do eixo;

I = momento de inércia;

W = peso da massa girante;

L = comprimento do eixo em balanço.

Se existir pontos de carga em outros lugares que não seja na extremidade, ou seja, vários impelidores, a carga equivalente W_e , pode ser calculada com a fórmula segundo Hesse (1950);

$$W_e = [W_1L_1^3 + W_2L_2^3 + W_3L_3^3 \dots]/L^3 \quad (37)$$

$L_1, L_2, \dots$: Distância entre impelidores.

Para um eixo com peso uniforme , a velocidade crítica pode ser calculada por:

$$N_{C(s)} = 234(8EI/W_sL^3) \quad (38)$$

Estas velocidades críticas podem ser combinadas pela fórmula de Dunkerly (1895) apresentada na equação 39:

$$\frac{1}{N_C^2} = \frac{1}{N_{C_w}^2} + \frac{1}{N_{C_s}^2} \quad (39)$$

Estas fórmulas tratam do eixo como sendo uma alavanca rigidamente engastada.

Elas aplicam-se quando o espaçamento entre mancais é pequeno ou tem um alto momento de inércia comparado com a porção em balanço. Do contrário, a velocidade crítica deve ser ajustada para baixo pelo fator de espaçamento de mancal (f_B);

$$f_B = \left[\frac{L}{L + \left(\frac{a \cdot I_L}{I_a} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (40)$$

onde;

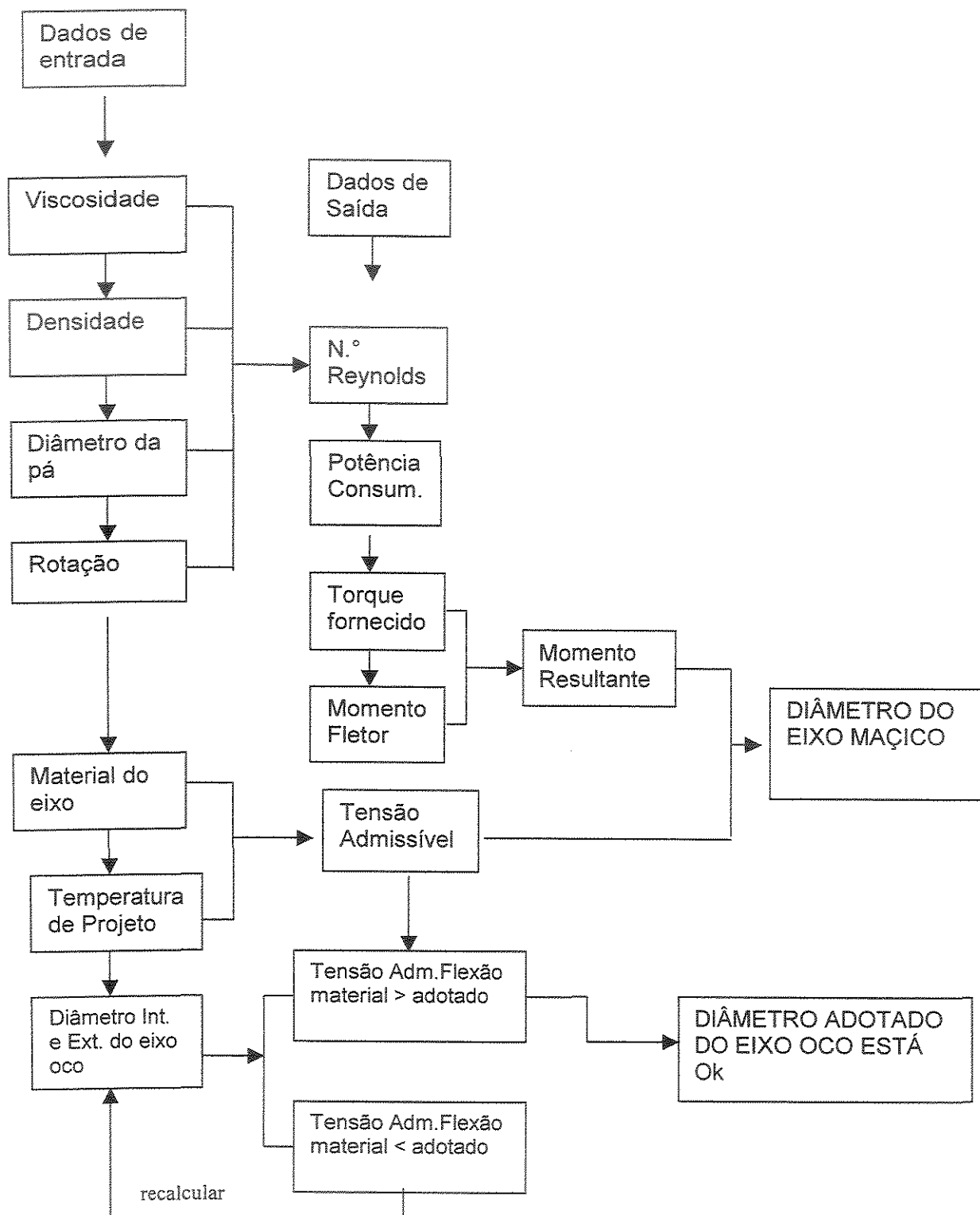
a = comprimento do eixo entre mancais,

L = comprimento da alavanca (parte em balanço),

I_L e I_a = momento de inércia do eixo em balanço e do eixo entre mancais, respectivamente.

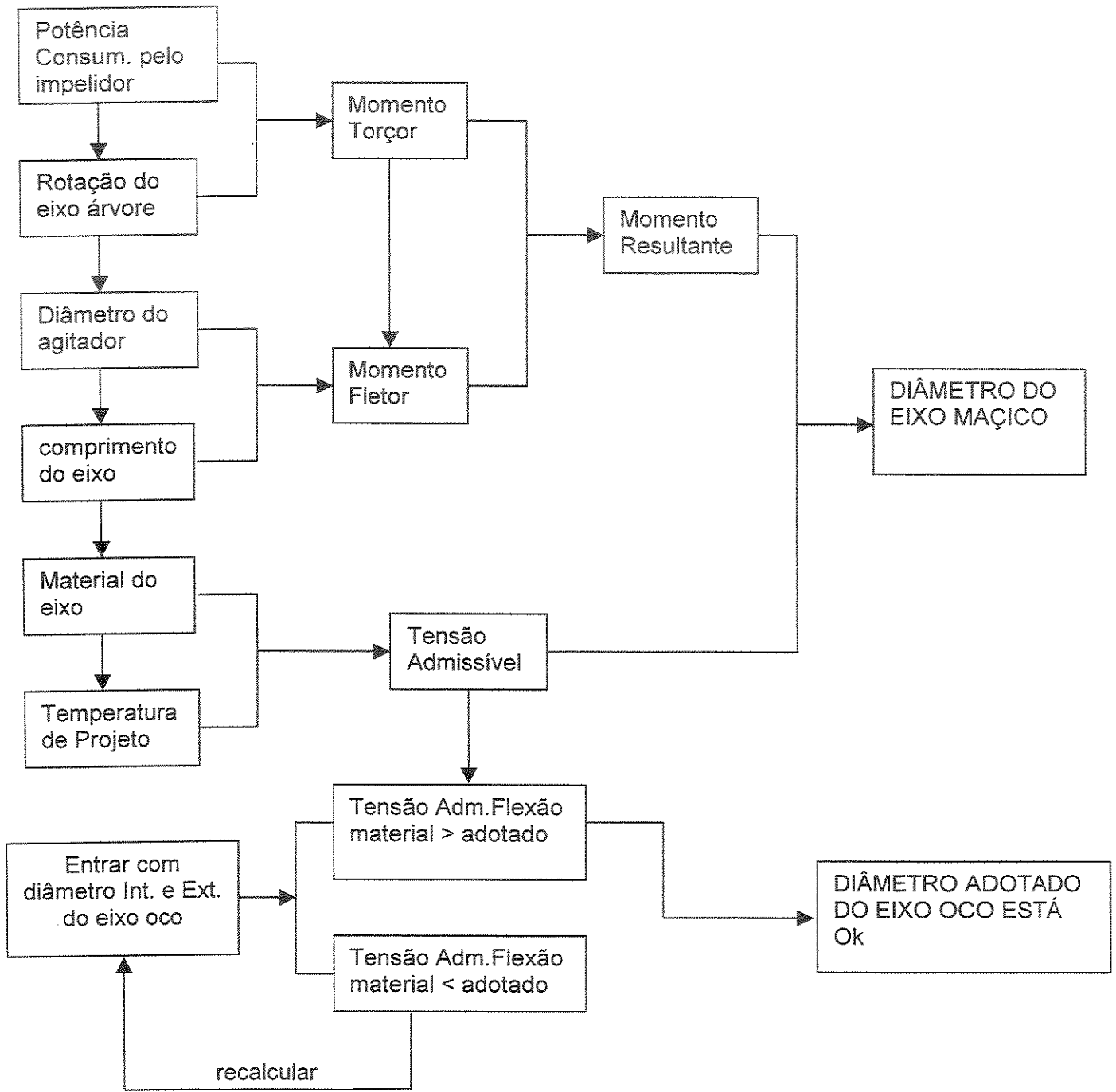
Fluxograma Programa –Condição 1

Cálculo do eixo quando não é conhecida a Potência do impelidor (alta eficiência).



Fluxograma Programa – Condição 2

Para cálculo do diâmetro do eixo do agitador quando se conhece a potência consumida.



Capítulo 7

Resultados e Exemplos

7.1. Proposta do Programa Computacional

O procedimento de cálculo em EXCEL estima a potência consumida pelo impelidor alta eficiência, na agitação, em regimes laminar e turbulento para produtos newtonianos e determina o diâmetro do eixo do agitador para condições de torque, flexão e rotação crítica, sendo que o limitante dentre estes varia conforme exigências de cada processo.

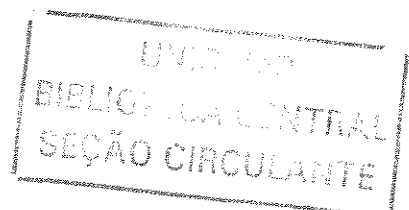
7.2. Potência estimada

Os valores a serem inseridos são as propriedades físicas do produto ou mistura, como viscosidade e densidade, a rotação e o diâmetro do impelidor. O programa calcula e indica a potência consumida pelo agitador tipo alta eficiência.

Para uma correta seleção do motor deve-se atentar para as perdas por atrito mecânico existentes na vedação e no redutor (caso seja acionado por um motoredutor) e adotar uma potência nominal comercial logo acima da calculada.

Após ter definido geometria do tanque e o sistema de agitação adequado para o processo, o próximo passo é determinar o diâmetro do eixo, sendo que o programa calcula em duas opções, uma para eixo maciço e outra para eixo oco.

Inicialmente a limitação para o uso do eixo vazado seria a utilização de longos eixos em alta rotação sem mancal de fundo (em balanço).



7.3. Dados de Entrada para determinação do diâmetro do eixo

Os dados de entrada, para cálculo do diâmetro do eixo, são:

- Potência adotada (Watts);
- Rotação do impelidor (rpm);
- Diâmetro do impelidor (m);
- Comprimento do eixo (do primeiro impelidor inferior até o mancal) (m);
- Distância entre impelidores (m);
- Material do eixo;
- Temperatura de Projeto ($^{\circ}\text{C}$).

Os dados de saída:

- Valor mínimo do diâmetro do eixo maciço para torção (mm);
- Valor mínimo do diâmetro do eixo maciço para flexão (mm);
- Valor da Rotação Crítica do sistema (rpm);
- Valor mínimo do diâmetro do eixo maciço para atender rotação crítica (mm);
- Valor mínimo do diâmetro do eixo vazado para torção (mm);
- Valor mínimo do diâmetro do eixo vazado para flexão (mm);
- Momento torçor (Kgf.m)
- Momento fletor (Kgf.m)
- Momento Resultante (Kgf.m)
- Módulo de flexão (m^3);

- Módulo de torção (m^3);
- Tensão de torção (Kgf/cm^2).

7.4. Exemplo n.º 1

Finalidade: Verificar diâmetros dos eixos (vazado) para torção, flexão e rotação crítica em dois sistemas de agitação: âncora e alta eficiência.

Dimensões do equipamento: Diam. int. 2800 mm x 3100 mm Alt. Cilíndrica;
Material dos eixos : Aço inoxidável austenítico SA-240-316L.

Agitação 1

Âncora com raspadores a 16 rpm motor 22kW com eixo árvore sujeito apenas à torção;

Adotado eixo vazado Diam. 110 mm x 80 mm;

Resultados:

Tensão de escoamento do material ($S_{adm.}$): 1758 Kg/cm^2 ;

Tensão calculada em função do eixo oco adotado ($S_{calc.}$): 715 Kg/cm^2 ;

Valor estimado da rotação crítica: 1700 rpm.

Conclusão: O eixo adotado está Ok, pois a tensão e a rotação de trabalho estão abaixo dos valores admissíveis.

Agitação 2

Impelidor alta eficiência diâmetro 1500 mm, eixo em balanço a 70 rpm, motor de 25 cv;

Adotado eixo vazado Diam. 110 mm x 80mm, comp. 1600 mm;

Tensão de escoamento do material ($S_{adm.}$): 1758 Kg/cm²;

Resultados:

Tensão calculada em função do eixo oco adotado ($S_{calc.}$): 824 Kg/cm²;

Valor estimado da rotação crítica: 1100 rpm.

Conclusão: O eixo adotado está Ok, pois a tensão e a rotação de trabalho estão abaixo dos valores admissíveis.

7.5. EXEMPLO n.º 2

Objetivo: Dimensionar sistema de agitação e comparar os resultados do método de cálculo aqui apresentado com os resultados de saída do programa comercial Cérebromix 2.0 (versão Demo).

Equipamento: Reator 10 m³

Agitação: Composta de 1 impelidor, sendo montado no cubo do eixo com três pás inclinadas (alta eficiência), sendo eixo em balanço.

Processo: Mistura de líquidos com pequena presença de sólidos (dissolução).

Os dados de entrada são:

Material interno do vaso : Aço inoxidável austenítico SA-240-304;

Temperatura de Projeto: 30°C ;

Viscosidade da mistura: 50 cPs;

Peso específico: 1500 Kgf/m³;

Rotação: 340 rpm;

Comprimento do eixo em balanço: 1500 mm;

Diâmetro do impelidor: 700 mm,

Número de chicanas: 4 .

Os dados de saída (resultados) são mostrados na tabela 7 a seguir, onde serão comparados os resultados obtidos aqui desenvolvido com o programa comercial .

Tabela 7 – Comparação dos resultados para um mesmo sistema de agitação.

	Programa apresentado	Cérebromix 2.0	Unidade
Número de bombeamento	0,473	0,477	
Capacidade efetiva de agitação	0,919	0,927	m³/s
Velocidade média do fluido no tanque	17,6	17,7	m/min
Nível de Agitação	9,6	9,8	
Número de Reynolds	83300	83300	
Potência	11,68	11,67	kW
Diâmetro do eixo	53	50	mm
Rotação Crítica (impelidor)	1120	1070	rpm
Rotação Crítica (Sistema)	720	NA	rpm

NA – Não se aplica

7.6. EXEMPLO 3

Objetivo: Dimensionar sistema de agitação e comparar os resultados do programa aqui apresentado com os resultados de saída do programa comercial Cérebromix 2.0 (versão Demo).

Equipamento: Reator 5 m³

Agitação: Composta de 1 impelidor, sendo montado no cubo do eixo com três pás inclinadas (alta eficiência), sendo eixo em balanço.

Processo: Mistura de líquidos.

Os dados de entrada são:

Material interno do vaso : Aço inoxidável austenítico SA-240-304;

Temperatura de Projeto: 30°C ;

Viscosidade da mistura: 2000 cPs;

Peso específico: 1500 Kg/m³;

Rotação: 100 rpm;

Comprimento do eixo em balanço: 2738 mm;

Diâmetro do impelidor: 800 mm,

Número de chicanas: 4 .

Os resultados são mostrados na tabela comparativa (8) a seguir :

Tabela 8 – Comparação dos resultados para um mesmo sistema de agitação (Exemplo 3).

	Programa apresentado	Cérebromix 2.0	Unidade
Número de bombeamento	0,389	0,390	
Capacidade efetiva de agitação	0,33	0,34	m ³ /s
Velocidade média do fluido no tanque	6,35	6,36	m/min
Nível de Agitação	3,47	3,50	
Número de Reynolds	800	800	
Potência	0,90	0,91	KW
Diâmetro do eixo	37	35	Mm
Rotação Crítica (Sistema)	148	150	rpm

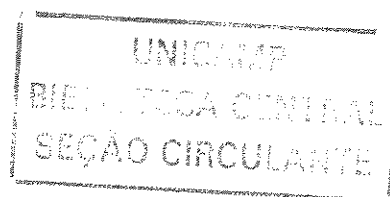
Capítulo 8

Conclusões e Sugestões

O objetivo principal foi desenvolver um método de cálculo (programa em Excel) simples e robusto, que utiliza modelos da literatura para cálculo da potência consumida pelo impelidor de alta eficiência, nível de agitação em função das características do sistema e cálculo do diâmetro do eixo para diversas condições, onde o mesmo sofre solicitações mecânicas.

Foram realizados inicialmente dois testes comparativos entre o programa desenvolvido nesta tese e o programa comercial, onde o valor dos “up grades” e para aquisição chegam a custar alto (mais de US\$ 2.000,00 o “up grade”). Os resultados apresentados mostram a robustez da metodologia de cálculo, o que viabiliza seu uso em aplicações industriais.

Pretende-se desenvolver um programa mais completo, inclusive com outros tipos de pás e que permita uma interface amigável com o operador e a rotina de cálculos, em ambiente Windows com o uso do software VisualBasic, Delphis, ou similar.



REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS - ASME Boiler and pressure vessel code. Sec. VIII , Div. 1, Edition 2001, Ad. 2003.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS - ASME Material, Sec. II , Part D, Properties, Edition 2001, Ad. 2003.

ASEPCO, Retirado de www.asepco.com/mixers em outubro 2004.

CHEMINEER, Retirado de www.chemineer.com em outubro 2004.

DICKEY, D. S., FASANO, J. B. How Geometry & Viscosity Influence Mixing. Chemical Engineering., p.42-46, Feb 2004.

DICKEY, D.S., FENIC, J.C. Dimensional analysis for fluid agitation system. Chemical Engineering, p. 139-145, January 1976.

DIETSCHE, W. Mix or Match: Choose the best mixers every time. Chemical Engineering., vol. 105, n.o 8, p.70-75, Aug 1998.

DUNKERLY , S. Phil. Trans. Roy. Soc. (London) , 185A , Pt 1, 279-360, 1985.

FASANO, J.B., BAKKER, A., PENNEY, W.R. Advanced impeller geometry boosts liquid agitation. Chemical Engineering, p. 110-6, Aug.1994.

GAMBRILL, J.S. Clean-in-place (CIP) Design considerations for bottom entry magnetically driven mixers. Interphex West Conference. San Diego October, 1996.

GOUVÊA, M.T., CRISI, G.S., LEITÃO, A.P. Estimating Power Consumption of Agitators. Chemical Engineering , p. 129-132, Nov. 1999.

HESSE, H. C., Prod. Eng. 21, 90 – 93 Dec. 1950.

HICKS, R.W., MORTON, J.R., FENIC, J.C. How to Design Agitators for Desired Process Response, Chemical Engineering , p. 102-110, April 1976.

IPIRANGA - ipirangaquimica.ipiranga.com.br/produtos/stirin. Extraído em setembro de 2002.

JAYANTI S., SHEKHAR, S.M. Mixing of Pseudoplastic Fluids Using Helical Ribbon Impellers. A.I.Ch.E Journal, Vol. 49 p. 2768-2772, Nov. 2003.

LABORATÓRIO DE CALOR E FLUIDOS, Apostila do curso EM 846. Determinação da Viscosidade: Método de Stokes & Copo Ford, F.E.M – UNICAMP, 2003.

LIGHTNIN – retirado de www.lightninmixers.com - em setembro 2004.

MAMMINI, E. O Hélice, retirado de www.webnauticos.com.br/biblioteca em novembro de 2003.

MYERS, K. J., REEDER, M. F., FASANO, J. B. Optimize Mixing by Using the Proper Baffles. Chemical Engineering Progress , p. 42-47, Feb 2002.

MYERS, K. J., FASANO, J. B. , CORPSTEIN, R. R. Influence of solid properties on the just-suspended agitation requirements of pitched blade and high-efficiency impellers. Canadian Journal of Chemical Eng., Vol. 72, p. 745-748, Aug. 1994.

NAGATA, S. Mixing – Principles and Applications. Kodansha Ltd. Tokyo 1975.

RAMSEY, D.W., ZOLLER, C.Z. How the design of shafts, seals and impellers affects agitator performance. Chemical Engineering Refresher, p.101-108, Aug 1976.

ROARK , R. J. Formulas for Stress and Strain. McGraw-Hill , New York , 1954.

SHIGLEY, J. E. Elementos de Máquinas. Rio de Janeiro , LTC SA , 1984.

TASKIN, G. O., WEI, H. The effect of impeller-to-diameter ratio on draw down of solids. Chemical Engineering Science, p. 2011-2022, Jan 2003.

TATTERSON, G. B. Scale-up and Design of Industrial Mixing Process. McGraw-Hill, Inc., 1994.

UHL AND GRAY, Mixing Theory and Practice. Academic Press, Inc, 1966.