



ANA MILENA TORRES GARAVITO

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO
CONSUMO DE POTÊNCIA PARA IMPELIDORES
ÂNCORA E HELICOIDAL USANDO FLUIDOS
PSEUDOPLÁSTICOS DE ALTA VISCOSIDADE**

Campinas

2013



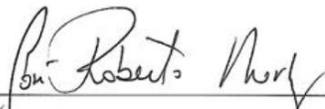
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**

ANA MILENA TORRES GARAVITO

**Determinação Experimental do Consumo de Potência Para
Impelidores Âncora e Helicoidal Usando Fluidos
Pseudoplásticos de Alta Viscosidade.**

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Nunhez

Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Química.



Prof. Dr. José Roberto Nunhez - Orientador

Campinas

2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

T636d Torres Garavito, Ana Milena, 1979-
Determinação experimental do consumo de potência para impelidores âncora e helicoidal usando fluidos pseudoplásticos de alta viscosidade / Ana Milena Torres Garavito. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: José Roberto Nunhez.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Tanques. 2. Mistura (Química). 3. Dinâmica dos fluidos. 4. Tanques de armazenamento. 5. processos químicos. I. Nunhez, José Roberto, 1961-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Experimental determination of the power consumption for using helical impellers, anchor and pseudoplastic fluids of high viscosity

Palavras-chave em inglês:

Tanks

Blending

Fluid dynamics

Storage tanks

Chemical processes

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos

Titulação: Mestra em Engenharia Química

Banca examinadora:

José Roberto Nunhez [Orientador]

Antônio Carlos Luz Lisboa

Celso Fernandes Joaquim Junior

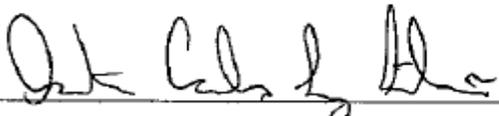
Data de defesa: 21-05-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

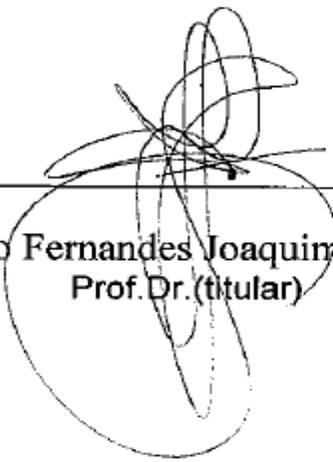
Dissertação de Mestrado defendida por Ana Milena Torres Garavito e aprovada em 21 de maio de 2013 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



José Roberto Nunhez
Prof. Dr. (titular)



Antônio Carlos Luz Lisboa
Prof. Dr. (titular)



Celso Fernandes Joaquim Junior
Prof. Dr. (titular)

Campinas (SP)-Brasil

Maio 2013

*Dedico este trabalho a meu esposo por seu amor,
apoio, compreensão e confiança e a minha família
por sempre acreditar em mim e por me dar força
nos momentos difíceis durante minha estadia no
Brasil.*

AGRADECIMENTOS

Eu quero agradecer primeiramente à Deus por sempre me dar forças para seguir a diante, apesar das dificuldades, se mostrando meu alimento espiritual e amigo incondicional e por colocar cada uma das pessoas que passaram em meu caminho, tornando assim, hoje, os sonhos em realidade.

À meus pais Hector e Blanca, por serem meus maiores exemplos de superação e perseverança, por todo esmero e esforço para me darem o melhor em todos os momentos e por serem meu grande apoio em todas as duras e difíceis etapas da vida.

À meus irmãos, sobrinhos, familiares e amigos por me permitirem compartilhar minhas alegrias e desejos.

À meu esposo, Ricardo Pinzón por todo o amor, compreensão e paciência e porque sempre esteve ao meu lado me apoiando em todos os aspectos da minha vida. Obrigada por fazer a minha vida feliz.

Agradeço muito ao Prof. Dr. José Roberto Nunhez por me permitir fazer parte de seu grupo de pesquisa, pela grande amizade, confiança, conselhos e, especialmente, por seu exemplo de vida.

Ao Dr. Diener Volpin, ao mestrando Daniel Simões, e ao Eng. Luís Henrique Saia Cereda pela ajuda incondicional tanto acadêmica como pessoal. A todos meus amigos do laboratório de LCFD, Dr. Everton Moraes, Helver Alvarez, Ronald Jaimes, Sebastian Moreno, Fredy Cabrales, Urbano Montañez, José Luis Gómez, pela amizade, apoio e companheirismo.

À todos meus amigos colombianos, equatorianos, brasileiros e peruanos na Unicamp. Em especial às meninas da minha casa, que tornaram muito mais agradável minha estadia no Brasil. E à Carolina de Paula Machado. Sem dúvidas, compartilhou comigo muitas experiências inesquecíveis.

Finalmente quero agradecer à Unicamp por ter aberto às portas para meu desenvolvimento acadêmico e pela oportunidade de receber uma excelente educação.

E à CAPES pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste projeto.

Nossa recompensa está no esforço, não o resultado.

Esforço total é uma vitória completa.

Mahatma Gandhi

RESUMO

Frequentemente os processos de agitação e mistura, tão fundamentais, são negligenciados na indústria como um todo, petroquímica, farmacêutica, química, de alimentos, etc. No entanto, existem sistemas em que o desempenho desses processos depende fortemente do grau de homogeneidade conseguido durante a mistura.

Quando o processo de mistura não está devidamente projetado e controlado, obtêm-se misturas com flutuações significativas nas suas características físicas e/o químicas, que no geral são indesejáveis e que suscitam perdas de lotes inteiros de produtos, aumentando o custo e o impacto ambiental do processo de produção. O custo final da energia utilizada no processo de

agitação e mistura depende de vários fatores, sendo um deles o impelidor empregado. Para analisar um processo são considerados fatores de interesse como: melhor agitação, menor tempo de mistura e menor potência consumida.

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo a determinação experimental do número de potência em função do número de Reynolds nos regimes turbulento e laminar para impelidores de proximidade tipo âncora (reta e tubular) com e sem raspadores e para um impelidor do tipo helicoidal, usando como fluido pseudoplástico de alta viscosidade a carboximetilcelulose (CMC) diluída em água. Desta forma, foi possível selecionar a configuração que apresentava o menor consumo de potência.

Para isto foi utilizado o protótipo em escala piloto desenvolvido pelo grupo de pesquisa do laboratório de Fluidodinâmica Computacional (LCDF) da Faculdade de Engenharia Química da Unicamp.

Palavras-chaves: Impelidores, tanques de mistura, âncora sem raspadores, helicoidal, número de potência.

ABSTRACT

Frequently, agitation and mixing processes, so fundamental ones, are neglected in the industry sector in general, such as petrochemical, pharmaceutical, chemical and food processing industries. However, there are systems in which the performance of the process depends strongly on the degree of homogeneity achieved during the mixing process.

When the mixing process is not properly projected and controlled, mixtures with significant fluctuations regarding their physical and/or chemical characteristics are obtained, and been that usually undesirable, it may cause the loss of entire product batches, increasing the production cost and the environmental impact of the production process. The final cost of the energy used in the agitation process depends on several factors, being one of them the type of impeller used. In order to analyze any process, factors of interest such as better agitation, least mixing time and least power consumption are considered.

This research aim is to experimentally determine the power number as a function of Reynolds number in turbulent and laminar regimes for anchor-type impellers (straight and tubular) with and without scrapers and for a helical-type impeller, using as a high viscosity pseudoplastic fluid the carboximethyl cellulose diluted in water.

For this purpose, it was used a pilot plant scale prototype, developed by the research group of the Computational Fluid Dynamic Laboratory (LCFD) of the Chemical Engineering College at Unicamp.

Keywords: Impellers, mixing tanks, anchor without scrapers, helical, power number.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	0
1 INTRODUÇÃO	0
1.1 MOTIVAÇÃO PELA PESQUISA	0
1.2 OBJETIVOS	1
1.2.1 Objetivo Geral	1
1.2.2 Objetivos Específicos	1
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
CAPÍTULO II	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO	3
2.2 AGITAÇÃO E MISTURA	3
2.3 AGITAÇÃO DE FLUIDOS VISCOSOS	4
2.4 COMPORTAMENTOS DE UM FLUIDO NÃO NEWTONIANO	5
2.4.1 Fluidos Viscoelásticos	6
2.4.2 Fluidos não newtonianos independentes do tempo	6
2.4.2.1 Pseudoplásticos	7
2.4.2.2 Dilatantes	7
2.4.2.3 Plásticos	8
2.4.3 Fluidos não newtonianos dependentes do tempo	9
2.4.3.1 Tixotrópicos	9
2.4.3.2 Reopéticos	9
2.5 CARBOXIMETILCELULOSE (CMC)	10
2.6 TIPOS DE IMPELIDORES	12
2.6.1 Impelidor de pás retas inclinadas	13

2.6.2	Impelidor tipo hélice naval.....	13
2.6.3	Impelidor de Alta Eficiência	14
2.6.4	Impelidor Âncora	15
2.6.5	Impelidor Helicoidal	16
2.6.6	Impelidor tipo Parafuso.....	17
2.6.7	Impelidor Âncora com Raspadores	17
2.6.8	Impelidores de Proximidade.....	18
2.7	TIPOS DE FLUXO GERADOS POR IMPELIDORES	19
2.7.1	Fluxo Radial	19
2.7.2	Fluxo Axial.....	20
2.7.3	Fluxo Tangencial.....	20
2.8	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.9	GRAU DE AGITAÇÃO.....	26
2.10	TORQUE.....	27
2.11	POTÊNCIA	28
2.12	NÚMEROS ADIMENSIONAIS.....	29
2.12.1	Número de Reynolds	29
2.12.2	Número de potência (Np).....	30
2.12.3	Curvas de Potência.....	30
CAPÍTULO III		31
3 MATERIAIS E MÉTODO.....		31
3.1	MATERIAIS	31
3.2	Planta Piloto de Agitação	33
3.3	MÉTODO	37
3.4	DIFICULDADES ENCONTRADAS	38
3.5	PREPARAÇÃO DO FLUIDO	39
3.5.1	Verificação do caráter pseudoplástico da mistura preparada.....	39
3.5.2	Tratamento dos dados obtidos.....	41

CAPÍTULO LV	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO	42
4.2 ENSAIOS REALIZADOS COM CARBOXIMETILCELULOSE (CMC) E ÁGUA E AS EQUAÇÕES UTILIZADAS	42
4.2.1 Impelidor de tipo helicoidal para fluidos pseudoplásticos.	43
4.2.2 Impelidor tipo âncora reto sem raspadores para fluidos pseudoplásticos	45
4.2.3 Impelidor de tipo âncora reta com raspadores	47
4.2.4 Impelidor tipo âncora tubular com raspadores	49
4.2.5 Impelidor tipo âncora tubular sem raspadores	50
4.3 Comparação entre curvas de potência para o impelidor tipo âncora reta com e sem raspadores	52
4.4 Comparação entre curvas de potência para impelidor tipo âncora tubular com e sem raspadores.	53
4.5 Comparação entre curvas de potência versus número de Reynolds para os cinco tipos de impelidores testados.	54
CAPÍTULO V	57
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	57
5.1 CONCLUSÕES	57
5.2 TRABALHOS FUTUROS	58
CAPÍTULO VL	59
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de classificação dos fluidos segundo comportamento reológico.....	5
Figura 2.2 Fluidos não newtonianos independentes do tempo.....	8
Figura 2.3 Diagrama reológico para fluidos dependentes do tempo. UFPE (2009).....	10
Figura 2.4 Fórmula estrutural da molécula de celulose. (Keller, 1982).	10
Figura 2.5 Estrutura idealizada de CMC com DS=1. (Keller, 1982).	11
Figura 2.6 Impelidor de pás retas inclinadas (KROMA, 2012)	13
Figura 2.7 Impelidor hélice naval (KROMA, 2012).....	14
Figura 2.8 Protótipo de impelidor de alta eficiência (L-CFD).....	14
Figura 2.9 Impelidor Âncora tubular (L-CFD).	15
Figura 2.10 Impelidor Helicoidal (L-CFD).....	17
Figura 2.11 Impelidor âncora reto com raspadores (L-CFD).....	18
Figura 2.12 Fluxo gerado por impelidores com fluxo tangencial (SILVA, 2010).	21
Figura 2.13 Representação do vórtice central num tanque de mistura. SILVA (1993).	27
Figura 2.14 Curva de potência elucidando regiões de diferentes regimes	30
Figura 3.1 Medidas dos impelidores (a) impelidor helicoidal (b) impelidor âncora.....	31
Figura 3.2 Representação da Planta-piloto de agitação do Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (a) e foto real da mesma (b)	33
Figura 3.3 Representação do tanque reacional: vista de frente(a), vista superior (b) e foto real (c).....	34
Figura 3.4 Representação do torquímetro posicionado no eixo do impelidor (a) e foto real do aparelho (b)	35

Figura 3.5 <i>Display</i> digital indicando valores de potência, torque e velocidade de rotação (a) e disposição do equipamento e do computador (b).....	35
Figura 3.6 Quadro elétrico com conversor de frequência da planta piloto do L-EFD	36
Figura 3.7 Vista lateral da porção responsável pela alteração de altura do impelidor (a) e foto real (b)	37
Figura 3.8 Relação entre velocidade e % de torque	40
Figura 4.1 Curva de número de potência (N_p) versus número de Reynolds (Re) para impelidor helicoidal e fluido pseudoplástico.	44
Figura 4.2 Curva de número de potência (N_p) versus número de Reynolds (Re) para impelidor âncora reto sem raspadores.	46
Figura 4.3 Curva de número de potência (N_p) versus número de Reynolds (Re) para impelidor âncora reto com raspadores.....	48
Figura 4.4 Curva de número de potência (N_p) versus número de Reynolds (Re) para impelidor âncora Tubular com raspadores.	49
Figura 4.5 Curva de número de potência versus número de Reynolds para impelidor âncora Tubular sem raspadores.....	51
Figura 4.6 Comparação entre as curvas de potência de impelidor âncora reta com e sem raspadores.	52
Figura 4.7 Comparação entre curvas de potência do impelidor âncora tubular com e sem raspadores.	53
Figura 4.8 Comparação entre curvas de potência para os cinco tipos de impelidores.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Aplicações da pureza do CMC.....	12
Tabela 2.2: Nível de agitação (NA) Vb: velocidade.	26
Tabela 3.1: Velocidade (rpm) para diferentes % de torque utilizado.....	40

NOMENCLATURA

LETRAS LATINAS

- P** Potência consumida
- D** Diâmetro do Impelidor
- N_{Re}** Número de Reynolds
- N_P** Número de Potência
- N_R** Número de fitas do impelidor
- N** Velocidade de Rotação do Impelidor
- h** Altura do Impelidor
- p** Passo da Hélice (Impelidor Helicoidal)
- w** Largura da Pá do Impelidor
- c** Parede do Tanque
- NA** Nível de agitação
- K** Índice de consistência do impelidor
- n** Índice de comportamento do fluxo
- F_i** Forças Inerciais
- F_v** Forças Viscosas
- Ks** Constante de proporcionalidade

LETRAS GREGAS

σ Taxa de Deformação

τ Torque

ρ Densidade do Fluido

SIGLAS

L-CFD Laboratório de Fluidodinâmica Experimental

CMC Carboximetilcelulose

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO PELA PESQUISA

Atualmente, a mistura é indispensável nas indústrias (petroquímicas, farmacêuticas, alimentícias, químicas entre outras), pois sem ela não existiriam inúmeros produtos que hoje preenchem as necessidades humanas. Para que se alcance um sucesso efetivo nesse tipo de ação são necessários tanques (reatores) para acomodar os insumos e assim depois do período de mistura, obter o produto final que se deseja.

De forma paralela ao estudo do processo, está o gasto energético do impelidor que ocasiona em boa porcentagem de um menor custo final do projeto. Mas não pode haver mistura sem impelidores. O uso de tais instrumentos é essencial para se alcançar o êxito esperado. Para a escolha do melhor impelidor é necessário um bom conhecimento do sistema e as informações necessárias do mesmo.

Há impelidores que atingem um melhor resultado quando empregados em meios com viscosidades específicas, outros apresentam menores tempos de misturas, outros apresentam boas vantagens em relação ao consumo de potência. Por conseguinte, a escolha do impelidor vai depender de qual parâmetro se quer priorizar no processo de mistura.

Infelizmente, os dados de consumo de potência de impelidores estão quase sempre limitados aos fabricantes destes aparelhos, e isso dificulta a comparação em muitos casos. Esse é o fator que faz com que esta pesquisa se torne mais cativante. Serão coletados dados de potência de impelidores do tipo helicoidal e âncoras retas e tubulares com e sem raspadores convencionais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Determinar experimentalmente o número de potência para impelidores de proximidade (helicoidal, âncora reto e âncora tubular), com e sem raspadores usando fluidos pseudoplásticos de alta viscosidade. Encontram-se valores na literatura para estes impelidores sem raspadores, mas informações com raspadores são pouco encontradas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar as propriedades reológicas do fluido composto por carboximetilcelulose (CMC) e água com o objetivo de obter dados do número de potência para impelidores de proximidade.
- Avaliar experimentalmente a variação de número de potência com respeito ao número de Reynolds, para o fluido estudado, usando um impelidor helicoidal e impelidores tipo âncora (reto e tubular) com e sem o uso de raspadores.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Introdução: No primeiro são apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho. E, finalmente, a organização da dissertação.

Revisão da literatura: Neste capítulo, são citados os trabalhos mais relevantes em tanques de mistura e, sobre, o consumo de potência de impelidores de proximidade para fluidos não newtonianos, e como são classificados os impelidores segundo a geometria e o fluxo gerado. Finalmente, alguns parâmetros são utilizados para caracterizar e desenvolver as relações de potência. É mostrada a dependência entre estes parâmetros e a curva de potência, destacando-se as faixas dos principais regimes.

Materiais e Método: Toda a parte experimental, incluindo-se o equipamento e programa de coleta e tratamento de dados, é exposta. O método utilizado para o desenvolvimento da dissertação também é explicado. Finalmente, também é exposta a preparação do fluido usado (CMC + água).

Resultados e Discussão: São apresentados os resultados obtidos e comparados com dados existentes na literatura de estudos na revisão bibliográfica. As dificuldades e os dados encontrados são abordados e explicados.

Conclusões e Sugestões: Neste capítulo pode-se apresentar as conclusões e análise geral, destacando-se a correlação com os objetivos do projeto. São apresentadas algumas sugestões de melhoria que, no futuro, podem ser estudadas e aperfeiçoadas.

Referências Bibliográficas

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO

Neste capítulo, são descritos os conceitos básicos e uma revisão bibliográfica, que tem relação com o estudo de processos de agitação e mistura.

2.2 AGITAÇÃO E MISTURA

A agitação e a mistura de fluidos são muito importantes nas indústrias que trabalham com os processos de alimentos, petróleo, entre outros. Várias de suas operações dependem disso.

Mccabe & Smith (1967), descrevem que a agitação ocorre quando um fluido está em movimento, inserido em um reator e que a mistura é a organização aleatória de fases separadas no início.

Segundo Paul et al. (2003), a agitação se refere ao movimento induzido em um fluido por meios mecânicos em um recipiente. O fluido pode circular no meio reacional ou possuir outro padrão de fluxo. Uma mistura é obtida como duas ou mais etapas, a priori separadas, que são de forma aleatória redistribuídas dentro ou através uma da outra.

Desta forma, os processos de mistura são diferentes dos processos chamados de agitação, pois quando existe agitação se considera apenas uma fase em quando, nos processos de mistura, alcançando uma nova homogeneização duas ou mais fases homogêneas de fluidos ou partículas a mistura das misturadas.

Pode-se vivenciar a mistura em vários tipos de indústrias. Exemplos importantes podem ser encontrados na indústria petroquímica, química fina, farmacêutica, biotecnológica, agroquímica, de processamento de polímeros, de tintas, cosmética, alimentícia, de papel e celulose, de processamento mineral, entre outras.

2.3 AGITAÇÃO DE FLUIDOS VISCOSOS

Segundo Shekhar, S, M Jayanti, S. (2003), existem diversos processos industriais que envolvem agitação; muitos deles operam com fluidos viscosos, os quais podendo ser newtonianos ou não-newtonianos. A operação de agitação de fluidos viscosos é frequentemente muito difícil e é uma etapa chave em um processo químico. As indústrias que fazem produtos de higiene pessoal, como cremes e loções, necessitam agitar fluidos altamente viscosos e, algumas vezes, como a viscosidade dependente do tempo ou o gradiente de velocidade deste fluido, o fluxo neste processo de agitação é, invariavelmente, laminar.

De acordo com Paul, *et al.* (2003), nesses processos, há um pequeno espaço entre o impelidor e a parede do tanque e, portanto, tem-se um alto consumo de potência por unidade de volume. Pode haver a presença de raspadores.

Para uma melhor execução na agitação destes tipos de fluidos, costumam-se utilizar impelidores de proximidade (grande diâmetro), como os âncoras e helicoidais. Estes tipos de impelidores são projetados para possibilitar a agitação de fluidos que são difíceis de bombear.

Os impelidores do tipo helicoidal promovem um movimento do fluido de cima para abaixo do tanque. Além disso, propiciam uma boa mistura. O consumo de potência destes impelidores é elevado.

2.4 COMPORTAMENTOS DE UM FLUIDO NÃO NEWTONIANO

Segundo Bird *et al.* (1960), a reologia é o estudo do comportamento deformacional e do fluxo de matéria submetido a tensões, sob determinadas condições termodinâmicas, ao longo de um intervalo de tempo. Inclui propriedades como: elasticidade, viscosidade e plasticidade.

Os fluidos não Newtonianos têm a relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento inconstante, podendo ser divididos em três grandes grupos: viscoelásticos, dependentes e independentes do tempo, conforme apresentado na Figura 2.1.

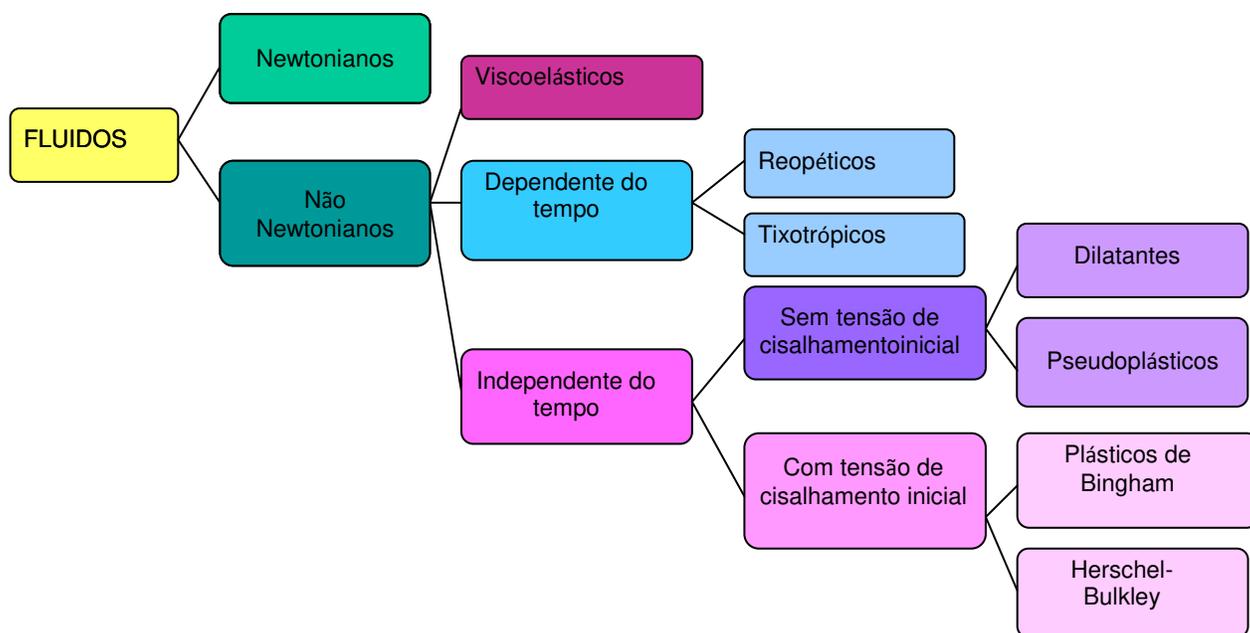


Figura 2.1 Esquema de classificação dos fluidos segundo comportamento reológico.

Fonte: http://www.setor1.com.br/analises/reologia/cla_ssi.htm

2.4.1 Fluidos Viscoelásticos

Conforme UFPE (2009), Os fluidos viscoelásticos são fluidos que possuem características de líquidos viscosos com propriedades elásticas (Modelo de Maxwell) e de sólidos com propriedades viscosas (Modelo de Kelvin-Voigt), ou seja, possuem propriedades elásticas e viscosas acopladas. Estas substâncias quando submetidas à tensão de cisalhamento sofrem uma deformação e quando esta cessa ocorre certa recuperação da deformação sofrida, ou seja, apresentam um comportamento elástico.

Como exemplos têm-se: massas de farinha de trigo; betume; gelatinas; queijo e saliva.

2.4.2 Fluidos não newtonianos independentes do tempo

São aqueles cujas propriedades reológicas independem do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, podendo ser divididos em dois:

- Sem tensão inicial: são aqueles que não necessitam de uma tensão de cisalhamento inicial para começarem a escoar. Compreendendo a maior parte dos fluidos não newtonianos.

Como exemplos têm-se: polpa de frutas; caldos de fermentação; solução de farinha de milho e açúcar.

2.4.2.1 Pseudoplásticos

Segundo Braseq (2009), a viscosidade do fluido pseudoplástico diminui à medida que aumentamos a taxa de cisalhamento, ou seja, (quando mais forças aplicaram ao material, menor a resistência viscosa).

Como exemplos citam-se: ketchup; polpa de frutas; carboximetilcelulose (CMC); Carbopol entre outros. O seu comportamento reológico pode ser visto na Figura 2.2

2.4.2.2 Dilatantes

No caso dos dilatantes, Ferreira, *et al.* (2005), consideram que trata-se exatamente do contrário do que acontece com os pseudoplásticos, ou seja, a viscosidade do fluido aumenta com aumento da taxa de cisalhamento. Esse tipo de fluido é mais raro que os pseudoplásticos.

Como exemplos citam-se: a argila, o amido de milho em água e a lama. Braseq, (2009),

O comportamento reológico desses fluidos pode ser visto na Figura 2.2

- Com tensão inicial: são os que necessitam de tensão de cisalhamento inicial para começarem a escoar.

Alguns exemplos são: fluidos de perfuração de poços de petróleo, sangue, iogurte e purê de tomate.

2.4.2.3 Plásticos

Esses fluidos necessitam de uma tensão finita, conhecida como tensão de escoamento ou "yield stress", para que ocorra movimento das partículas Ferreira, *et al*, (2005).

Esse tipo de fluido passa a ter suas representações gráficas de forma que no início da aplicação da tensão de cisalhamento, não há aumento do gradiente de cisalhamento, ou seja, é zero, até que comece a haver ligeiro comportamento em forma de curva, que logo se transforma em uma reta, como nos líquidos newtonianos. Ou seja, começa no zero, comporta-se por pouco tempo como dilatante e rapidamente tem característica de newtoniano. Isso significa que logo que se consegue uma mudança desses fluidos em sua viscosidade, temos que esta depois de pouco tempo não varia mais, independente da força de cisalhamento que se aplica sobre o fluido. Quando eles apresentam essa característica são chamados plásticos de Bingham, cujo comportamento é mostrado na Figura 2.2

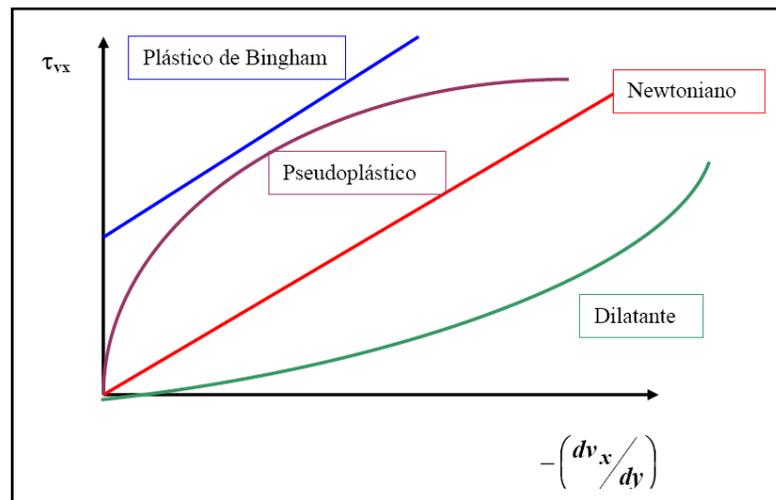


Figura 2.2 Fluidos não newtonianos independentes do tempo.

2.4.3 Fluidos não newtonianos dependentes do tempo

Apresentam propriedades que variam, além da tensão de cisalhamento, com o tempo de aplicação desta tensão, para uma velocidade de cisalhamento constante. Citam-se como exemplos: tintas, ketchup, argila bentônica, (Braseq, 2009).

Esses fluidos são classificados em: tixotrópicos; reopéticos.

2.4.3.1 Tixotrópicos

Tratam-se dos fluidos que têm sua viscosidade diminuída com o tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, voltando a ficar mais viscosos à medida que a tensão de cisalhamento cessa. Exemplos desses fluidos são: as suspensões concentradas, emulsões, soluções protéicas, petróleo cru, tintas, ketchup conforme na Figura 2.3 UFPE (2009).

2.4.3.2 Reopéticos

É o inverso dos tixotrópicos, ou seja, a viscosidade destes fluidos aumenta com o tempo de aplicação da tensão, retornando à viscosidade inicial quando esta força cessa. Exemplo: argila bentônica conforme mostra a figura 2.3 UFPE (2009).

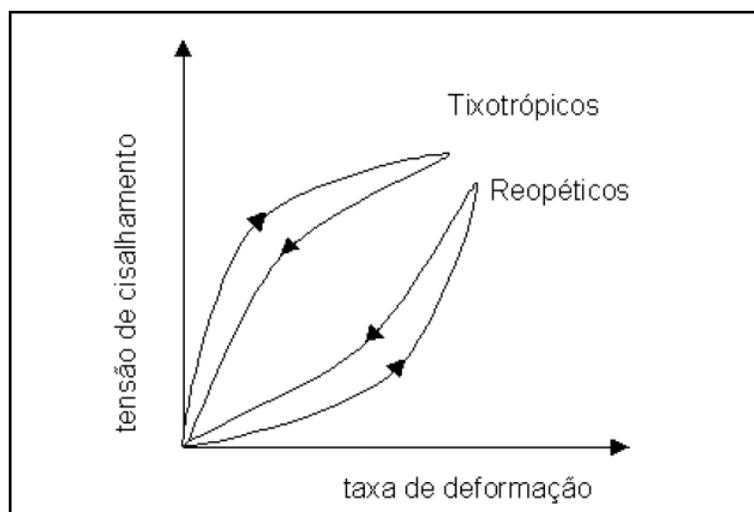


Figura 2.3 Diagrama reológico para fluidos dependentes do tempo. UFPE (2009).

2.5 CARBOXIMETILCELULOSE (CMC)

A Carboximetilcelulose (CMC) foi usada como um potencial substituto à gelatina. No entanto, problemas técnicos e custos de produção elevados impediram a comercialização do produto. Mais tarde verificou-se que a CMC melhorou detergentes que o contêm, evitando a redeposição da sujeira na roupa. Com o advento da Segunda Guerra Mundial, materiais comumente utilizados para fazer a limpeza natural da roupa (como os ácidos graxos) foram utilizados para fins militares, dando origem a uma maior utilização e altura de solúveis em água gengivas, e um interesse renovado fabricação do CMC.

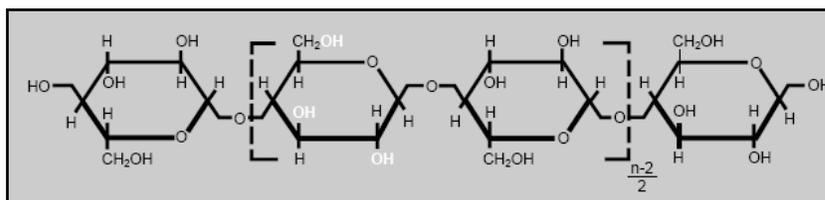


Figura 2.4 Fórmula estrutural da molécula de celulose. (Keller, 1982).

A celulose é o mais abundante de todos os materiais orgânicos, fazendo parte dos tecidos fibrosos das plantas. Também está presente em vegetais e outros alimentos. A celulose é solúvel em água, sua solubilidade aumenta pelo tratamento com álcali para inchar a estrutura, seguida por reação com ácido tricloroacético, cloreto de metila para produzir óxido de propileno ou carboximetilcelulose (CMC).

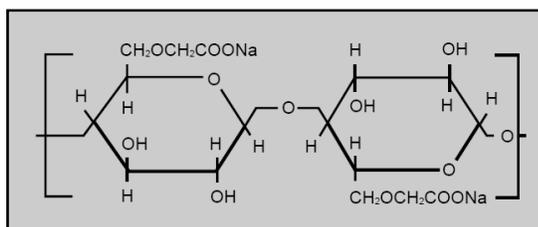


Figura 2.5 Estrutura idealizada de CMC com DS=1. (Keller, 1982).

A primeira aplicação do alimento CMC foi levado em sorvete, cujo sucesso se deve em parte à escassez de gelatina após a Segunda Guerra Mundial. Em meados de 1950, a CMC foi estabelecida como um estabilizador de sorvete. A partir desta data, bem como o uso de alimentos tem sido um *boom* de produtos farmacêuticos, cosméticos, cimentos, colas e tecidos.

A CMC é um polieletrólito aniônico que reage com proteínas, muitas vezes melhorando suas propriedades funcionais.

Soluções diluídas de CMC têm pH ao redor de 7. Isto diz que os grupos carboximéticos estão na forma de sal e, portanto, há muito pouco ácido livre em solução. (Keller, 1982).

As aplicações da CMC, de acordo com a sua pureza, são apresentados na tabela 2.1

Tabela 2.1. Aplicações da pureza do CMC

Grau	Pureza	Aplicações
Crudo	60-80%	Detergentes, lamas de perfuração, papel.
Refinado	97% mínimo	Papel, pinturas, adesivos, cerâmica e têxteis
Puro	99.5% mínimo	Alimento, bebidas, cosméticos, fraldas

Assim como a maioria dos Hidrocolóides, a CMC tem um comportamento não newtoniano. Esse comportamento, geralmente, é pseudoplástico devido ao fato de que as moléculas de cadeia longa tendem a se orientar na direção do fluxo.

2.6 TIPOS DE IMPELIDORES

A escolha do tipo de impelidor a ser adotado é função dos requisitos específicos de cada processo. Os impelidores podem gerar fluxos axiais, radiais, ou tangenciais e diferentes relações entre bombeamento e cisalhamento. A escolha com a relação mais adequada e com melhor padrão de descarga de fluxo é determinante no desempenho do sistema. O padrão de fluxo é também diretamente afetado pela disposição do impelidor (Joaquim Jr. et al., 2007)

2.6.1 Impelidor de pás retas inclinadas

Atende a maioria das aplicações pelo fato de trabalhar com líquidos de viscosidades entre 1 e 100000 Cp. Gates e Henley (1975) e, posteriormente, Bowen (1985) afirmam que o agitador de fluxo axial mais comum é o constituído por quatro pás retas inclinadas a 45°.

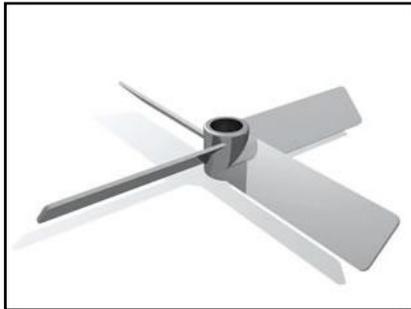


Figura 2.6 Impelidor de pás retas inclinadas (KROMA, 2012)

2.6.2 Impelidor tipo hélice naval

Este impelidor é utilizado em fluxos pouco viscosos até (3000 cP) e é indicado para médias e altas rotações. Produz corrente longitudinal e tangencial, gera alta turbulência e baixo consumo de potência. Também tem elevada capacidade de deslocamento volumétrico e moderado consumo de potência.

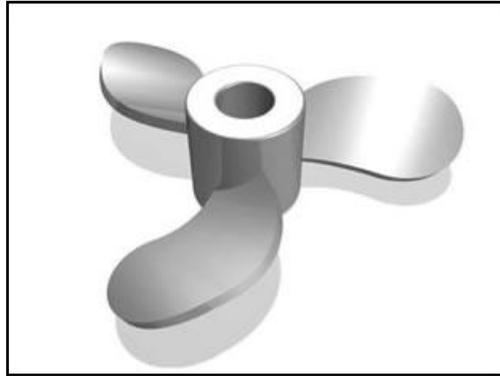


Figura 2.7 Impelidor hélice naval (KROMA, 2012).

2.6.3 Impelidor de Alta Eficiência

É geralmente composto por três pás inclinadas entre 30 e 60°, especialmente concebidas para reduzir a geração de vórtices em suas extremidades posteriores. Tem baixo consumo de potência (aproveitamento de energia se faz na forma de fluxo e altura manométrica); é especial para mistura de líquidos miscíveis, suspensão de sólidos, e operações nas quais atua na transferência de calor.



Figura 2.8 Protótipo de impelidor de alta eficiência (L-CFD)

2.6.4 Impelidor Âncora

É empregado na agitação de fluidos de médias ou altas viscosidades (40000-50000 cP). A largura da pá é em torno de $D/10$, o consumo de potência varia em relação a (altura /diâmetro). Este impelidor tem bom desempenho na otimização da transmissão de calor e apresenta maior economia de energia. O tempo de mistura é um pouco superior ao de fita helicoidal. Pode ser dotado de raspadores, evitando a aderência ou impregnação do fluido nas paredes do tanque e melhora a transferência de calor.

Os impelidores do tipo âncora apresentam uma forte componente de velocidade tangencial e uma componente axial fraca. Além disso, podem ter função de raspadores e, assim, diminuem a resistência convectiva interna, fazendo com que a transferência de calor se eleve.

O número de potência de agitadores do tipo âncora depende do espaço livre entre o impelidor e a parede do tanque.



Figura 2.9 Impelidor Âncora tubular (L-CFD).

2.6.5 Impelidor Helicoidal

De acordo com Battaglini (1998), o impelidor do tipo helicoidal são utilizados em fluidos muito viscosos ou de características não newtonianas, em regimes laminares. Este impelidor tem características semelhantes ao impelidor âncora. A figura 2.10 mostra o impelidor helicoidal utilizado nos ensaios.

O impelidor helicoidal que tem vasto uso para muitos materiais viscosos, faz com que haja um movimento físico do fluido do topo ao fundo do reator e opera com uma maior eficiência quando comparado ao impelidor do tipo âncora e, isto se dá devido à existência das componentes tangencial e axial. Podem ser de fita simples, fita dupla, fita simples com parafuso ou fita quádrupla. Ao analisar o de fita dupla, verifica-se que existem hélices internas e externas. As internas têm o papel de bombear em uma direção (descendente) enquanto que as externas bombeiam na direção ascendente. Ao aumentar H (altura do impelidor), o valor de N_p se eleva.

Os Agitadores helicoidais com fita utilizam um menor tempo de mistura para uma mesma potência quando operados em líquidos viscosos, mas apresentam uma maior lentidão quando comparados a turbinas que atuam em líquidos de menor viscosidade.

De modo geral estes agitadores apresentam tempo de mistura superior em comparação com agitadores do tipo turbinas, mas a potência consumida é menor para a mesma velocidade do agitador.



Figura 2.10 Impelidor Helicoidal (L-CFD).

2.6.6 Impelidor tipo Parafuso

Este tipo de impelidor geralmente apresenta tamanho relativo próximo à metade do diâmetro do tanque. É usado para misturar polímeros muito viscosos que tem sensibilidade ao cisalhamento. É adequado para trabalhos em que há o uso de fluidos pseudoplásticos.

2.6.7 Impelidor Âncora com Raspadores

De acordo com Ho e Kwong (1973), o impelidor âncora é dotado de raspadores, evitando a aderência ou impregnação do fluido nas paredes do tanque. Para uma maior contribuição de transferência de calor em equipamentos com troca térmica. Removem o fluido quente da parede do tanque para que o fluido frio entre em contato com a superfície aquecida, melhorando as características de transferência de calor do sistema.

O uso do raspador em um sistema de agitação aumenta o consumo de potência devido ao atrito entre a parede do tanque e o raspador. Sendo que este de impelidor é mais eficiente porque a agitação é mais homogênea. O material dos raspadores pode ser de teflon.



Figura 2.11 Impelidor âncora reto com raspadores (L-CFD).

2.6.8 Impelidores de Proximidade

Estes impelidores são utilizados para fluidos de elevada viscosidade e de difícil bombeamento. Entretanto, são os únicos impelidores apropriados para determinados processos químicos como, por exemplo, na indústria cosmética.

Impelidores de proximidade geralmente não são tão utilizados para escoamento turbulento, pois a transferência da quantidade de movimento já se apresenta de forma eficiente. Assim o diâmetro necessário para o impelidor, neste caso, varia de um quarto à metade do diâmetro do tanque. Sobretudo, os impelidores âncoras são algumas vezes utilizados para regime turbulento porque conseguem fazer a raspagem da superfície de troca térmica e/ou diminuem a resistência convectiva interna, elevando-se a transferência de calor.

Impelidores dos tipos helicoidal e âncora podem também ser empregados em sistemas turbulentos onde o alto cisalhamento não é necessário. Partindo disso, há uma vantagem considerável para processos em que a viscosidade do fluido se altera significativamente e as condições laminar e turbulenta ocorrem em diferentes estágios.

2.7 TIPOS DE FLUXO GERADOS POR IMPELIDORES

Uma das formas de classificação de impelidores é de acordo com o regime de mistura (turbulento e laminar), sendo as características geométricas e seus diâmetros os responsáveis pela caracterização do fluxo gerado e capacidade de mistura.

Os impelidores âncora ou hélice são muito utilizados em regime laminar, porque possuem diâmetros muito próximos do diâmetro interno do tanque, uma vez que o transporte de quantidade de movimento do escoamento laminar é baixo. Devido a essas características, geralmente não se utilizam chicanas em escoamento laminar.

Os impelidores de fluxo turbulento são de tipo Rushton, de pás retas inclinadas, e turbinas. Estes não necessitam de um grande diâmetro devido à alta taxa de dissipação de energia turbulenta e quantidade de movimento gerado. Além disso, não se deve esquecer que varias mudanças geométricas estão sendo estudadas pelos fabricantes de impelidores a fim de maximizar os fluxos gerados e minimizar o gasto de energia.

Os impelidores são classificados em três grandes grupos quanto ao tipo de fluxo gerado, são eles: radial; axial e tangencial.

2.7.1 Fluxo Radial

São classificados assim, os impelidores que geram linhas de fluxo de forma perpendicular ao eixo do agitador, ou seja, o líquido é impulsionado contra as paredes do reator. São

características dos impelidores deste grupo: geralmente apresenta potência consumida elevada; capacidade dispersiva grande e mostram uma agressividade maior ao produto.

Tipos de aplicações: dispersões de gases, em processos de forte transferência de massa e dissolução de materiais no estado sólido. Nesses casos os impelidores mais usados são o Rushton, Smith e Scaba.

2.7.2 Fluxo Axial

São classificados assim, os impelidores que geram linhas de fluxo paralelas ao eixo do agitador, ou seja, a massa líquida é impulsionada contra o fundo do reator. Características deste grupo: é baixo consumo de potência, grande abrangência por sua distribuição geométrica do fluxo dentro do reator, e baixa agressão ao produto.

Tipos de aplicações: mistura de produtos líquidos, em processos de transferência de calor, e sólidos em suspensão. Os impelidor usados são a hélice naval, as turbinas de pás retas inclinadas e impelidores de alto rendimento.

2.7.3 Fluxo Tangencial

São classificados assim, os impelidores que geram linhas de fluxo circular em regime de fluxo laminar. Destinados à mistura de produtos de elevada viscosidade (acima de 50000 cP), impulsionam a grande massa de líquido ao redor da parede do reator. De um modo geral, os impelidores tangenciais tem um elevado consumo potência, alto torque e elevado investimento inicial. A figura 2.12 mostra esquematicamente este tipo de fluxo.

Tipo de aplicação: pode ser utilizado para homogeneizar resinas, misturar fluidos muito viscosos e dissolver materiais no estado sólido em meios viscosos ou com formação de subprodutos altamente viscosos. O impelidor usado é de tipo âncora.

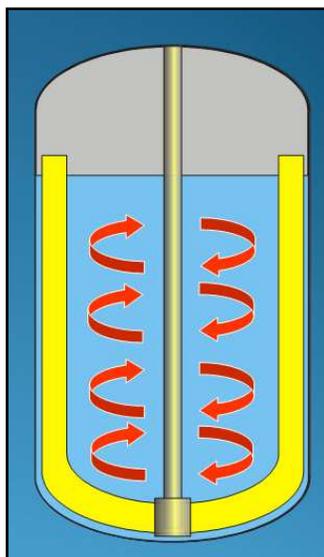


Figura 2.12 Fluxo gerado por impelidores com fluxo tangencial (SILVA, 2010).

2.8 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Michelan, R; (2006), destacam que os impelidores de vários tipos têm sido usados para produzir agitação e mistura na fase líquida. Para produzir mistura, é necessário suprimento de energia e isto, normalmente, é produzido através da rotação de um impelidor. A potência fornecida não depende unicamente do tipo de impelidor e da velocidade da rotação, mas também das propriedades físicas do fluido e da forma do tanque, além da disposição das componentes do sistema como chicanas, serpentinas e suportes. Portanto, para caracterizar o comportamento de um impelidor é necessário levar em consideração todo o ambiente em que opera o sistema.

Quando um impelidor é inserido em um reator contendo um fluido, a movimentação do fluido produz vórtices. Com isto, um padrão de escoamento é estabelecido impelidores, fluidos e reator e a única forma de mudança nas condições de fornecimento de potência é a mudança na velocidade de rotação do impelidor. Por esta razão a demanda de potência é controlada pela

rotação do impelidos. Assim sendo, o consumo de potência é usado para caracterizar vários impelidores em relação ao ambiente em que estes estão inseridos.

Hixson & Luedeke (1937), desenvolveram os estudos de White *et al.* (1934) e verificaram diversos impelidores na medida em que fizeram análises teóricas a respeito dos mesmos. Constataram que para calcular o número de Reynolds, o diâmetro do tanque deveria ser utilizado como valor de comprimento característico. As análises foram feitas, alterando-se parâmetros como a profundidade do líquido, inclinação das pás e a distância entre o fundo do tanque e o impelidor. Desenvolveram também uma melhor elucidação da forma de equação geral para relacionar potência.

Nagata (1975) estudou a potência consumida em um sistema com agitação. Através de dados empíricos, o pesquisador verificou que ao aumentar a larguras das pás dos impelidores o consumo de potência se eleva. Tal fato é ainda mais relevante quando a viscosidade do fluido do sistema é elevada. O autor verificou que o número de Reynolds influencia na inclinação das pás e na altura da superfície do líquido. Quanto maior é o número de Reynolds, maior a significância das variáveis.

Nagata (1975), utilizou em suas experiências um método simples de determinação de potências e torques, colocando extensores elétricos no eixo árvore do impelidor. Estes extensores emitem um sinal elétrico que posteriormente é amplificado e transformado em valores de torque. Tanto este método, quanto a utilização de dinamômetro de torção, apresentam certos desvios. O método utilizado nesta dissertação, não apresenta tais erros experimentais.

Oldshue (1983) refere-se à escolha do impelidor a ser utilizado em um determinado processo, a qual depende do tipo de mistura que se pretende obter para o processo. Os impelidores são projetados em séries homólogas, ou seja, geometricamente semelhantes.

Joaquim Jr et al. (2007) mostram que para se estudar o consumo de potência pelo impelidor, pode-se fazer uso do conceito de número de potência (N_p), um número adimensional, que, no caso de regime laminar corresponde a $P/\rho N^2 D^3$ e no caso de regime turbulento corresponde a $P/\rho N^3 D^5$.

As curvas de potência para diferentes impelidores podem ser usualmente encontradas na literatura, mas é preciso ressaltar que tais curvas são aplicáveis a fluidos newtonianos e não-newtonianos para a geometria do tanque em que foi testada. Por este motivo, é de grande importância se obter dados experimentais para diversos impelidores.

O sistema de agitação é, também, integrado a geometria do tanque, para propiciar as melhores condições e maior economia de operação do processo. A geometria do vaso resulta da otimização do uso de chapas que reduz o custo do equipamento, diminuindo o número de cortes e de soldas e com uma padronização que atende à racionalização da produção e as necessidades do mercado.

A agitação pode ser feita por impelidores:

- De fluxo: onde a própria turbulência do fluido provoca a agitação, como na recirculação por bombas ou nos misturadores estáticos.
- Rotativos rápidos: o elemento mecânico possui grande velocidade angular. São exemplos as hélices navais, pás retas, - inclinadas ou não – e a turbina radial.
- Rotativos lentos: âncora e helicoidal, utilizados em fluidos muito viscosos.

Bourne *et al.* (1969), publicaram um estudo sobre o consumo de potência em líquidos viscosos com o uso de impelidores helicoidais. Foram testadas cinco configurações de impelidores helicoidais, para diversos fluidos em diferentes concentrações. Foram utilizados hidroxipropil metil celulose, sódio carboximetil celulose, glicerina e xarope de glicose diluída como fluidos, com a geração de curvas de potência para estes fluidos.

O autor também colabora num estudo de fluxo gerado por impelidores helicoidais, com o uso de esferas de plásticos coloridos e uma câmera de vídeo, utilizado soluções de água e açúcar; glicerol e água, etc.

Hall & Godfrey (1970), em seu trabalho usaram cinco impelidores helicoidais de fita para estudar o consumo de potência. As correlações feitas consideram o efeito de altura e largura da

fita e o afastamento entre o agitador e a parede do tanque. Como fluidos de estudo, os pesquisadores utilizaram hidroxipropil metil celulose e xarope de milho diluído. Para explicar os resultados, curvas de N_p x Re foram apresentadas. Algumas alterações no número de potência foram elaboradas para que houvesse um melhor ajuste de curvas. Utilizando-se a geometria do impelidor e o número de Reynolds, uma equação de predição do número de potência mostrada na Equação 1:

$$N_p = 66Re_a^{-1} \left(\frac{p}{d}\right)^{-0,73} (N_R) \left(\frac{h}{d}\right) \left(\frac{w}{d}\right)^{0,5} \left(\frac{c}{d}\right)^{-0,6} \quad \text{Eq. 1}$$

A equação 1 correlaciona alguns parâmetros importantes como o valor de número de potência (N_p), o número de Reynolds aparente (Re_a), o passo do impelidor (p), o diâmetro do impelidor (d) o número de fitas do impelidor (N_R), a altura do impelidor (h), o espaço entre o impelidor e a parede do tanque (c), a largura da fita (w).

Chavan e Ulbrecht (1973), publicaram dados obtidos para um impelidor helicoidal do tipo fita-parafuso deselveram uma correlação para a potência consumida de impelidores helicoidais do tipo fita-parafuso. A correlação se utiliza de dimensões relacionadas à montagem, como o diâmetro, altura e largura do impelidor e a altura deste imerso no fluido. Os autores concluíram que o consumo de energia de um impelidor fita é semelhante ao de um impelidor fita-parafuso.

Kai et al. (1989), utilizaram um fluido com viscoelasticidade para estudar padrões de fluxo e velocidade de distribuição do mesmo. Para tal projeto, necessitaram de um tanque agitado com um impelidor do tipo âncora. Concluíram que para números de Reynolds menores, a magnitude da velocidade tangencial para fluido viscoelástico apresenta valores maiores se comparados com fluidos newtonianos. Os autores desenvolveram um modelo reológico para fazer uma correlação da potência consumida para fluidos Newtonianos, pseudoplásticos e viscoelásticos.

Carreau e *et al.* (1993), avaliaram o efeito da reologia sobre o consumo de potência com impelidores do tipo helicoidal, como soluções aquosas de xarope de milho e glicerol como fluido

newtoniano, carboximetilcelulose (CMC) e gama de xantana como não newtoniano, para diferentes configurações de impelidores.

Cheng *et al.* (1994), executaram experimentos com soluções de glucose de milho e água; água e CMC; glicerol e goma de xantana, entre outros, a fim de estudar a agitação no regime de transição para impelidores helicoidais.

Nomura *et al.* (1996) desenvolveu um impelidor âncora dobrado para um balão de fundo redondo com um pescoço pequeno. Os impelidores âncora são utilizados especialmente em pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e tecnologias nos laboratórios de indústrias e universidades. O tempo de mistura e a potência consumida foram coletados em um largo intervalo do número de Reynolds. Estes parâmetros foram analisados e comparados com valores obtidos para dois tipos tradicionais de impelidores usados para fluidos de viscosidades relativamente altas em um balão de fundo redondo e para aqueles calculados para um impelidor helicoidal de dupla fita fixado em um recipiente cilíndrico. A potência consumida para o impelidor do tipo âncora dobrado foi bem superior a dos dois impelidores tradicionais, mas apresentou quase o mesmo consumo que um impelidor helicoidal de dupla fita. Em contrapartida, o tempo de mistura para o impelidor do tipo âncora dobrado foi menor do que um quinto se comparado ao tempo apresentado pelos dois impelidores tradicionais e teve similaridade ao calculado para um impelidor helicoidal de dupla fita. Pôde-se concluir que o impelidor do tipo âncora dobrado precisa de menor taxa média de dissipação de energia para atingir o mesmo tempo de mistura entre outros impelidores.

Battaglini (1998), afirmou que os impelidores helicoidais são apropriados para fluidos de carácter não-newtoniano e com viscosidade bem elevada, quando em regimes laminares. Alguns destes impelidores são providos de raspadores e tal característica auxilia na transferência de calor em trocadores de calor.

Battaglini (1998), também estudou o consumo de potência em fluidos de varias viscosidades para os impelidores dos tipos âncora convencional âncora modificada, fita helicoidal e parafuso em tanques cilíndricos de diferentes configurações como os de fundos retos e toro esféricos.

Wang *et al.* (1999), realizaram um estudo do consumo de potência para impelidores helicoidais em fluidos newtonianos e não-newtonianos. Foram empregadas soluções de xarope de milho como fluido newtoniano, e carboximetilcelulose dissolvido em xarope de milho como fluido pseudoplástico.

2.9 GRAU DE AGITAÇÃO

Algumas das dificuldades encontradas em sistemas de agitação são determinar a rotação, a potência requerida, e o diâmetro do impelidor. Experimentalmente, chegou-se a correlações que são capazes de dizer se o nível de agitação de um determinado processo está eficiente.

Para poder quantificar o grau de agitação tem-se que fixar a velocidade média de bombeamento do fluido no tanque. Em uma escala de 1,8 a 18,3 m/min se relaciona essa velocidade com valores da 1 a 10 como mostra a Tabela 2.2. A grande maioria dos processos necessita de velocidades de bombeamento nesta faixa e valores acima desta não promovem uma melhor mistura. O nível de agitação (NA) fica definido através da divisão da velocidade média do fluido por 1,8.

Tabela 2.2: Nível de agitação (NA) Vb: velocidade.

Baixo		Médio		Alto	
NA	Vb (m/min)	NA	Vb (m/min)	NA	Vb (m/min)
1	1,8	3	5,4	7	12,6
2	3,6	4	7,2	8	14,4
		5	9	9	16,2
		6	10,8	10	18

Os níveis de agitação são fatores importantes na determinação do melhor sistema. Os níveis 1 e 2 são características das aplicações que requerem o menor movimento possível para o produto, os níveis 3 a 6 são características das aplicações industriais, e 7 a 10 são usados em processos de alto cisalhamento.

Além disso, a posição é fundamental nas operações do equipamento, pois influi na formação de vórtices ou na aspiração de ar para o produto. O vórtice pode se formar, dependendo das condições de potência e rotação, por exemplo, quando o impelidor é colocado no centro de um tanque sem chicanas ou quando está muito perto da superfície do líquido. Uma das maneiras de se evitar a formação de vórtices é deslocar o impelidor do centro do tanque.

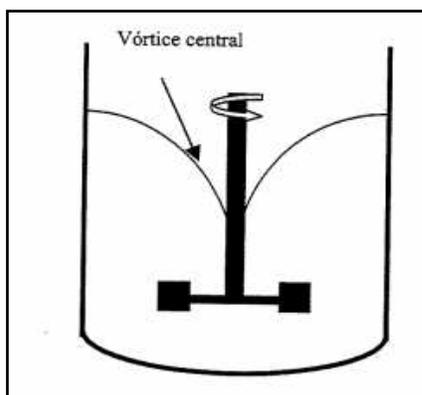


Figura 2.13 Representação do vórtice central num tanque de mistura. SILVA (1993).

2.10 TORQUE

O torque também é um fator muito importante para os sistemas de agitação e mistura. O produto da força aplicada sobre o fluido e a distância radial à $2/3$ da pá do impelidor define o torque.

Geralmente, quando maior a viscosidade do meio, maior será o torque aplicado ao eixo e aos impelidores.

O torque é uma relação entre a velocidade de rotação do impelidor (N) em (rps) e a potência consumida no processo (P), definido como a produto da força aplicada sobre o fluido e a distância da pá do impelidor.

Nos projetos de misturadores, o torque é um fator de grande importância, pois influencia diretamente o custo do equipamento. As variáveis consideradas para calcular o torque são: tamanho do eixo do impelidor, peso do impelidor e as propriedades do fluido a ser misturado.

Para cálculo do torque nos sistemas de agitação pode ser pela Equação 2.

$$\tau = \frac{P}{2\pi N} \quad \text{Eq. 2}$$

2.11 POTÊNCIA

Na potência em um sistema de agitação sem troca de calor, o principal custo de operacional está relacionada ao custo de energia aplicada.

Segundo Grangeiro da Silva J. (2002), a potência transferida do impelidor para o fluido, tem outros fatores que se devem considerar nos projetos de equipamentos de mistura, como os consumos energéticos causados por aspectos mecânicos, perda de carga no motor, mais neste caso só foi considerado o primeiro; a energia por unidade de tempo necessária para superar as forças atuantes nas pás do impelidor.

O valor de potência é calculado levando-se em conta o consumo total de energia necessário para que a mistura desejada seja atingida.

Em geral, o número de potência é função das geometrias do tanque e do impelidor, das propriedades do fluido e da velocidade de rotação do impelidor.

A potência consumida no processo é proporcional à velocidade de rotação, ao diâmetro do impelidor (D) e à densidade (ρ):

$$P = K\rho N^3 D^5 \quad \text{Eq. 3}$$

2.12 NÚMEROS ADIMENSIONAIS

Existe uma série de números adimensionais aplicáveis a sistemas de agitação, sendo difícil de encontrar os melhores para a representação dos sistemas de mistura. E os mais importantes são: o número de Reynolds, o número de Froude, o número de bombeamento, o número de mistura, e número de potência.

2.12.1 Número de Reynolds

O número de Reynolds é um dos mais importantes e comuns e outros adimensionais para sistemas de agitação, apresenta uma relação entre as forças inerciais (F_i) e as forças viscosas (F_v), para tanques de mistura. Isto pode ser melhor visualizado nas equações 4 à 6.

$$\mathbf{Re} = \frac{F_i}{F_v} \quad \mathbf{Eq. 4}$$

$$\mathbf{Re} = \frac{\rho D^2 v^{2-n}}{K \cdot K_S^{n-1}} \quad \mathbf{Eq. 5}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}\boldsymbol{\sigma}^n \quad \mathbf{Eq. 6}$$

Onde K é o índice de consistência e n é o índice de comportamento do fluxo. O valor de n esta na faixa de $0 < n < 1$.

Em tanques de mistura com número de Reynolds menor que 10, o fluxo é considerado laminar. Quando o resultado for superior a 10^4 , o fluxo é turbulento. O intervalo entre 10 e 10.000 é uma faixa chamada zona de transição.

2.12.2 Número de potência (N_p)

De acordo com Joaquim Jr. et al. (2007), o número de potência é o coeficiente de arraste nos sistemas com agitação e fornece uma medida adimensional do requerimento energético do impelidor para a operação de mistura, como mostra a equação 7:

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad \text{Eq. 7}$$

2.12.3 Curvas de Potência

Estudando o consumo de potência, se visualiza a região laminar num gráfico de N_p x N_{Re}, (figura 2.14) notar que a relação entre o número de potência e o número de Reynolds apresenta perfil linear. Na região chamada de transição, a relação citada apresenta um caráter não linear. Na região turbulenta verifica-se que o número de potência é constante e independente do Número de Reynolds. Todavia, este fato não indica que a potência seja constante. Ela aumenta na região turbulenta ao se elevar o número de Reynolds. Assim sendo, não é apreciável existir um exagero no valor do Número de Reynolds

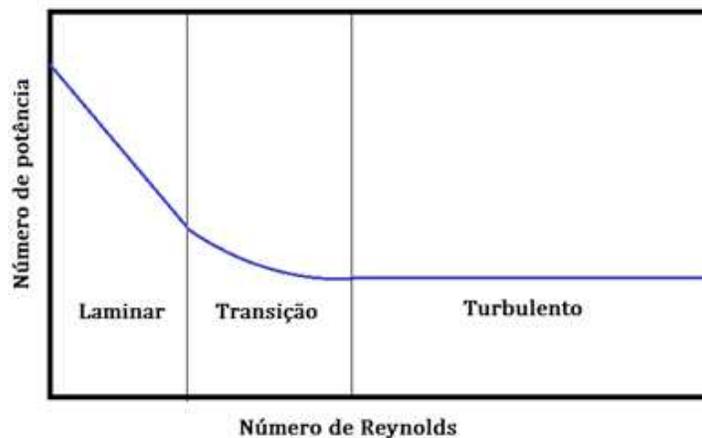


Figura 2.14 Curva de potência elucidando regiões de diferentes regimes

CAPÍTULO III

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento deste projeto foi necessária a utilização de alguns materiais e equipamentos:

- Impelidor fabricados com aço inoxidável, do tipo helicoidal com dupla hélice, ver medidas na Figura 3.1a
- Impelidor fabricados com aço inoxidável, do tipo âncora reto com raspadores, ver medidas na Figura 3.1b
- Impelidor fabricados com aço inoxidável, do tipo âncora tubular com raspadores, ver medidas na Figura 3.1b

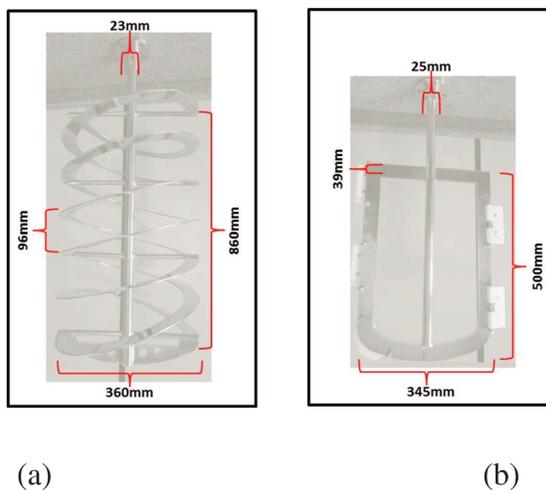


Figura 3.1 Medidas dos impelidores (a) impelidor helicoidal (b) impelidor âncora

- Viscosímetro Brookfield® LVDV-I Prime com sensor de temperatura;
- Medidor de torque Magtrol®; paquímetro Mitutoyo 0.05 mm de precisão.
- Planta-piloto de agitação, obtida com o projeto FAPESP 03/08640-7;
- Carboximetilcelulose (CMC);
- Água;

Para a programação dos parâmetros e acionamento da rotação do impelidor foi necessário o *software*

MT-MANAGER® da SEW®

Uma forma de se medir a potência fornecida e o torque gerado é através do conversor de frequência, que se utiliza de parâmetros elétricos e usa o seguinte programa:

MOVITOOLS® 4.10 da SEW®

Para fazer a coleta dos dados do torque, velocidade de rotação e potência mecânica automaticamente, utiliza-se o *software* do torquímetro denominado:

TORQUE® 1.0 da MAGTROL®

Os dados são coletados através de um torquímetro localizado numa caixa inserida entre o eixo e o motor, cujo display se localiza num equipamento externo. Este programa permite ainda imprimir os dados e salvá-los em planilha do Excel. Para tratar os dados e fazer a plotagem dos mesmos foi necessário o uso do *software*:

MICROSOFT® EXCEL 2003

Este programa também foi muito útil para fazer o cálculo das médias dos dados já que o TORQUE® 1.0 registra dados a cada fração de segundo, gerando uma imensa quantidade de registros.

3.2 Planta Piloto de Agitação

A planta piloto pode ser melhor observada através da Figura 3.2.



(a)

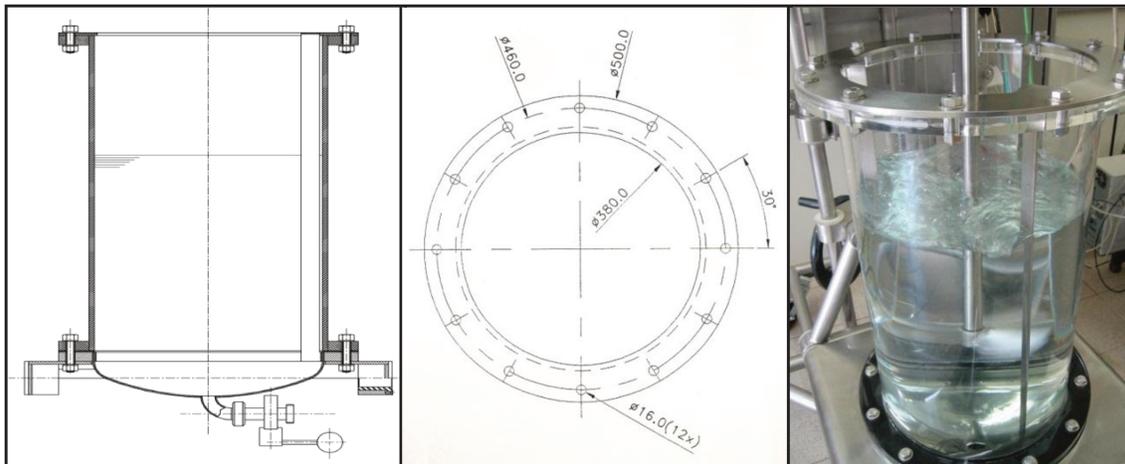


(b)

Figura 3.2 Representação da Planta-piloto de agitação do Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (a) e foto real da mesma (b)

O sistema conta com um tanque de 50L feito de acrílico, eixo do impelidor ligado a um torquímetro, sistema de direção para posicionar tanque e impelidor, leitor de torque com conversão de potência, painel elétrico com conversor de frequência e *softwares* para aquisição e registro de dados.

O tanque apresenta diâmetro interno próximo a 380 mm e altura de cerca de 760 mm. O fundo é toroesférico 10%. A representação do tanque é apresentada na Figura 3.3.



(a)

(b)

(c)

Figura 3.3 Representação do tanque reacional: vista de frente(a), vista superior (b) e foto real (c)

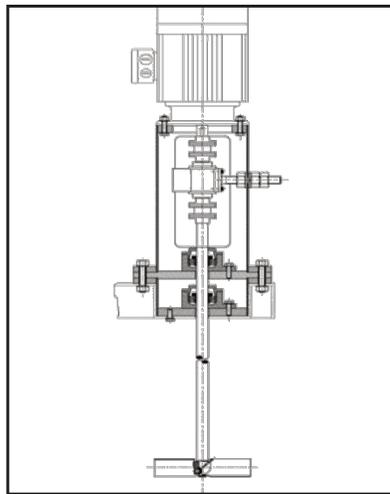
Para que haja a medição de torque e, assim,

obter-se a potência que foi consumida no processo, existem duas formas distintas:

- Obtenção de dados através do uso do torquímetro;
- Obtenção de dados através de valores de amperagem e tensão

Usando-se duas maneiras distintas para a medição, há uma maior garantia da qualidade dos dados coletados empiricamente. O método do torquímetro leva em consideração a potência consumida pelo impelidor e o método que envolve parâmetros elétricos considera, sobretudo, o consumo de potência de todo o sistema.

O torquímetro é o responsável pela captura do torque gerado. O aparelho é conectado a um *display* digital ligado ao computador. O sinal capturado é então enviado para o *software* apropriado (MAGTROL[®]). Neste programa o torque é convertido em potência. A Figura 3.4 mostra a esquematização do torquímetro posicionado no eixo do sistema e a foto do mesmo



(a)



(b)

Figura 3.4 Representação do torquímetro posicionado no eixo do impelidor (a) e foto real do aparelho (b)

O *display* digital também mostra, além do torque, valores de potência e velocidade de rotação. A Figura 3.4 mostra além do aparelho, sua disposição junto ao computador no laboratório.



(a)



(b)

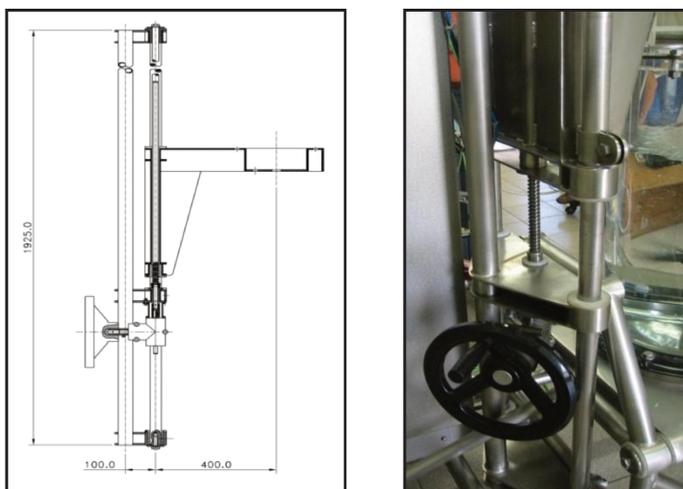
Figura 3.5 *Display* digital indicando valores de potência, torque e velocidade de rotação (a) e disposição do equipamento e do computador (b)

O quadro elétrico da planta piloto apresenta como seu principal componente, o conversor de frequência. As medidas de amperagem e tensão são obtidas através deste quadro. Este conversor se liga ao computador através de uma saída serial e contando com o *software* MOVITOOLS[®] gera os sinais elétricos que são transformados em potência consumida e torque. A Figura 3.5 mostra o quadro elétrico com o conversor de frequência.



Figura 3.6 Quadro elétrico com conversor de frequência da planta piloto do L-EFD

O sistema pode ser ajustado de acordo com as exigências do projeto. Tanto a base ao qual o tanque está inserido, quanto à altura ao qual o impelidor devem estar posicionados podem ser alteradas. A Figura 3.6 mostra a porção responsável da planta para se alterar a altura do impelidor.



(a)

(b)

Figura 3.7 Vista lateral da porção responsável pela alteração de altura do impelidor (a) e foto real (b)

3.3 MÉTODO

Posicionado o impelidor, a chave de força foi ligada e posteriormente todos os disjuntores do sistema de agitação foram acionados.

Os programas TORQUE[®] 1.0 e MT-MANAGER[®] foram abertos e após a sincronização de ambos, os parâmetros de interesse foram configurados (rampa de aceleração, tempo e velocidades de rotação inicial e final (5-200 rpm)).

Terminado este processo o motor foi acionado e assim os dados foram coletados e armazenados nos programas para um futuro tratamento.

3.4 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Problemas com o fluido utilizado também foram encontrados. A homogeneização deste fluido (carboximetilcelulose CMC) é muito complicada. Leva-se aproximadamente dois dias na preparação e na homogeneização completa deste tipo de fluido devido a suas propriedades, e pelas características do fluido. Os testes deviam ser realizados em no máximo oito dias, pois, para garantir a estabilidade em suas propriedades físico-químicas e assim evitar erros na coleta dos resultados.

Outro problema importante a ser mencionado é a irregularidade das paredes do tanque e ao fato dele não ser uma circunferência perfeita, o que, em alguns momentos, fez com que o impelidores de proximidade como em nosso caso, encostassem em certos pontos na parede do tanque, fato este que pode ter prejudicado a precisão dos dados obtidos para certas velocidades de rotação. Além disso, o impelidor helicoidal foi fabricado um pouco fora de centro, com raios ligeiramente diferentes em alguns pontos (é muito difícil a construção destes equipamentos). O equipamento possui um sistema próprio de compensação desta excentricidade do eixo, o que tornou possível a realização do experimento. Entretanto, as irregularidades da parede, apesar de não impedirem a obtenção dos dados experimentais, podem ter ocasionado um consumo de potência mais elevado do equipamento, o qual somente poderá ser constatado quando uma parede com uma menor irregularidade (este é um projeto futuro do L-CFD) for obtida para o equipamento. Além destes fatores, notou-se que na obtenção de valores para o regime de transição foi necessária a utilização de diversas soluções com concentrações diferentes, e estas causaram dificuldades na obtenção de uma curva contínua desde o regime laminar até o turbulento.

3.5 PREPARAÇÃO DO FLUIDO

Colocou-se aproximadamente 50L de água no tanque, e foram agregadas 1000 g de Carboximetilcelulose sódica (CMC). Realizou-se a homogeneização do sistema com agitação e velocidades acrescentadas progressivamente variando de 5 em 5, para obter uma diluição satisfatória. A viscosidade da mistura foi anotada manualmente, e iniciou-se a realização de toma de dados com os respectivos impelidores.

3.5.1 Verificação do caráter pseudoplástico da mistura preparada

A fim de se obter maior confiabilidade nos resultados apresentados, verificou-se conforme as recomendações na literatura, se a mistura de uma solução a 2% de CMC em água apresentava caráter pseudoplástico. Isto foi feito utilizando-se os valores de porcentagem de torque (%) e de velocidade de rotação (rpm), fornecidos pelo viscosímetro Tabela 3.1 Com estes valores, construiu-se uma curva de porcentagem do torque utilizado pela velocidade de rotação, de modo a avaliar o perfil desta curva. A curva é apresentada na Figura 3.7.

Tabela 0.1 Velocidade (rpm) para diferentes % de torque utilizado

% de torque utilizado	Velocidade (rpm)
0,5	6,76
1	10,54
2	15,84
2,5	17,56
3	19,06
4	22,16
5	24,78
10	34,62
20	48,46
50	71,94

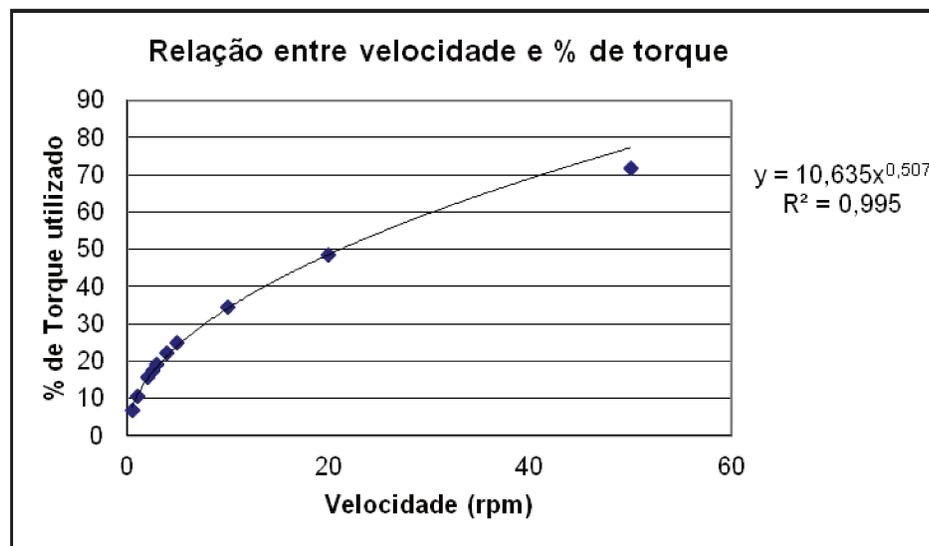


Figura 0.8 Relação entre velocidade e % de torque

Observando-se a curva obtida, esta tem o comportamento de fluidos pseudoplásticos. No gráfico de porcentagem de torque (%) e de velocidade de rotação (rpm), percebe-se que a viscosidade é diminuída com o aumento da taxa de deformação.

3.5.2 Tratamento dos dados obtidos

Para o tratamento dos dados obtidos por meio das provas e gerados pelo programa Torque 1.0, se fez uma planilha de Excel que facilitou o processamento dos dados, obtendo-se a medida dos valores de potência consumida e torque para cada rotação (variando de 5 em 5 rpm) nas quais o impelidor agitou o fluido em questão, como amostra a Figura 3.8.

Resumo				Calcular		Fluido		
Impelidor	Helicoidal	Diâmetro	0,38	Re	Po	n	K	Densidade
Velocidade [RPM]	Potência média	Torque médio	Medições					
5	2,69523577	5094,97561	123	1,58853768	587908	0,51	10,64	0,9998
10	6,56390741	6256,72037	540	4,47131538	178972	0,51	10,64	0,9998
15	11,31565639	7147,526432	454	8,19104955	91417,35	0,51	10,64	0,9998
20	16,34555507	7749,874449	454	12,5855757	55709,89	0,51	10,64	0,9998
25	21,76463080	8282,324895	474	17,5614243	37979,91	0,51	10,64	0,9998
30	27,48759259	8731,495885	486	23,0556482	27758,47	0,51	10,64	0,9998
35	33,67227841	9171,172348	528	29,022104	21413,67	0,51	10,64	0,9998
40	40,11977365	9571,179963	539	35,4250825	17092,32	0,51	10,64	0,9998
45	47,07919149	9949,137331	517	42,2358838	14086,86	0,51	10,64	0,9998
50	53,94410097	10293,13786	515	49,4307864	11766,75	0,51	10,64	0,9998
55	60,82217444	10557,71805	493	56,9897562	9967,736	0,51	10,64	0,9998
60	51,89364852	8255,08014	643	64,8955803	6550,63	0,51	10,64	0,9998
65	38,60964314	5673,361431	1020	73,133262	3833,349	0,51	10,64	0,9998
70	42,10968700	5743,637607	1000	81,6895826	3347,422	0,51	10,64	0,9998

Figura 0.9 Planilha Excel

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 INTRODUÇÃO AO CAPÍTULO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na experimentação física efetuada na planta piloto de agitação do Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (LCFD) da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP, além da discussão dos mesmos ao utilizar diferentes tipos de impelidores para determinar o número de potencia em fluidos pseudoplásticos.

4.2 ENSAIOS REALIZADOS COM CARBOXIMETILCELULOSE (CMC) E ÁGUA E AS EQUAÇÕES UTILIZADAS

A variação do número de potência foi analisada em relação à variação do número de Reynolds para os cinco tipos de impelidores testados.

Seguindo o modelo de Power-law, para fluidos não newtonianos as equações utilizadas foram:

Número de potência.

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad \text{Eq. 8}$$

Número de Reynolds.

$$\mathbf{Re} = \frac{\rho D^2 v^{2-n}}{K \cdot K_s^{n-1}} \quad \mathbf{Eq. 9}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K} \boldsymbol{\sigma}^n \quad \mathbf{Eq.10}$$

Estas foram às equações de onde os dados experimentais foram extraídos para as diferentes configurações testadas.

4.2.1 Impelidor de tipo helicoidal para fluidos pseudoplásticos.

Com os experimentos para a mistura de Carboximetilcelulose (CMC) e água, foram obtidas curvas experimentais do número de potência em função do número de Reynolds para o impelidor helicoidal testado. As curvas obtidas utilizando-se a mistura de Carboximetilcelulose (CMC) e água a diferentes concentrações se apresentaram-se bastante satisfatórias, a se comparar o perfil obtido através dos experimentos com o encontrado em Nagata ver figura 4.1. As curvas são apresentadas na Figura 4.1

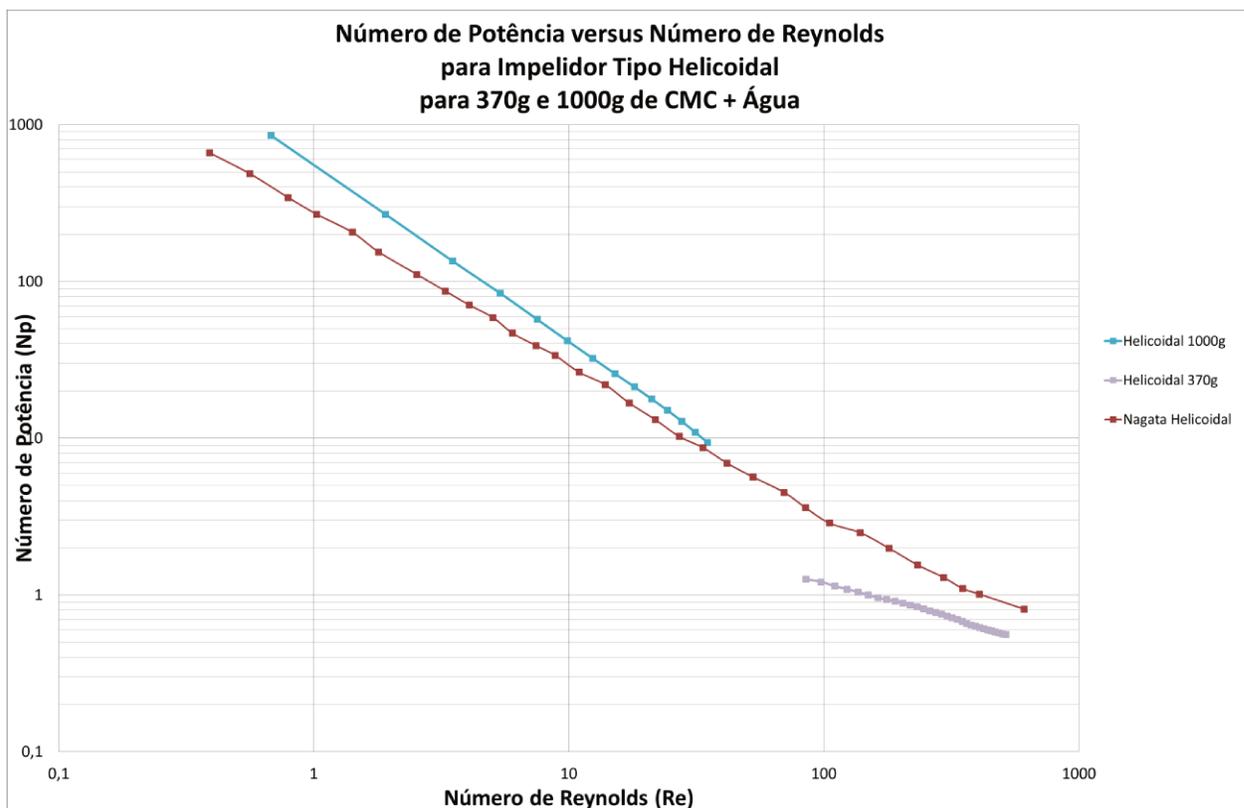


Figura 4.1 Curva de número de potência (N_p) versus número de Reynolds (Re) para impelidor helicoidal e fluido pseudoplástico.

Como pode ser observado na Figura 4.1, tanto os dados do inversor de frequência quanto os do torquímetro mostram os mesmos resultados, levando-se em conta os erros experimentais e de equipamento envolvidos.

Analisando-se o gráfico na Figura 4.1, pode-se dizer que os testes com carboximetilcelulose (CMC) e água para o impelidor helicoidal foram satisfatórios, uma vez que as curvas dos vários testes realizados são bastantes similares umas às outras.

Pode-se observar na Figura 4.1, que o número de potência diminui à medida que aumenta o número de Reynolds. Também verificou-se que para regime laminar os valores são mais próximos uns dos outros, pois trabalhou-se com fluidos de viscosidades altas e com baixas

rotações, ou seja trabalham melhor em regime laminar, concordando com os dados apresentados na literatura (NAGATA, 1975).

Comparando-se os gráficos obtidos, nota-se que apresentam um comportamento com a mesma tendência do gráfico *log-log*, tal qual era esperado.

O impelidor helicoidal tem como característica a ação suave e a alta movimentação vertical do fluido e trabalha a baixas rotações. A mistura ocorre na região laminar com o fluido movendo-se por caminhos tortuosos, este tipo de impelidor é mais eficiente em regime laminar.

4.2.2 Impelidor tipo âncora reto sem raspadores para fluidos pseudoplásticos

A Figura 4.2, mostra a variação do número de potência em função de número de Reynolds para um impelidor do tipo âncora reto sem raspadores no tanque de acrílico de 50L.

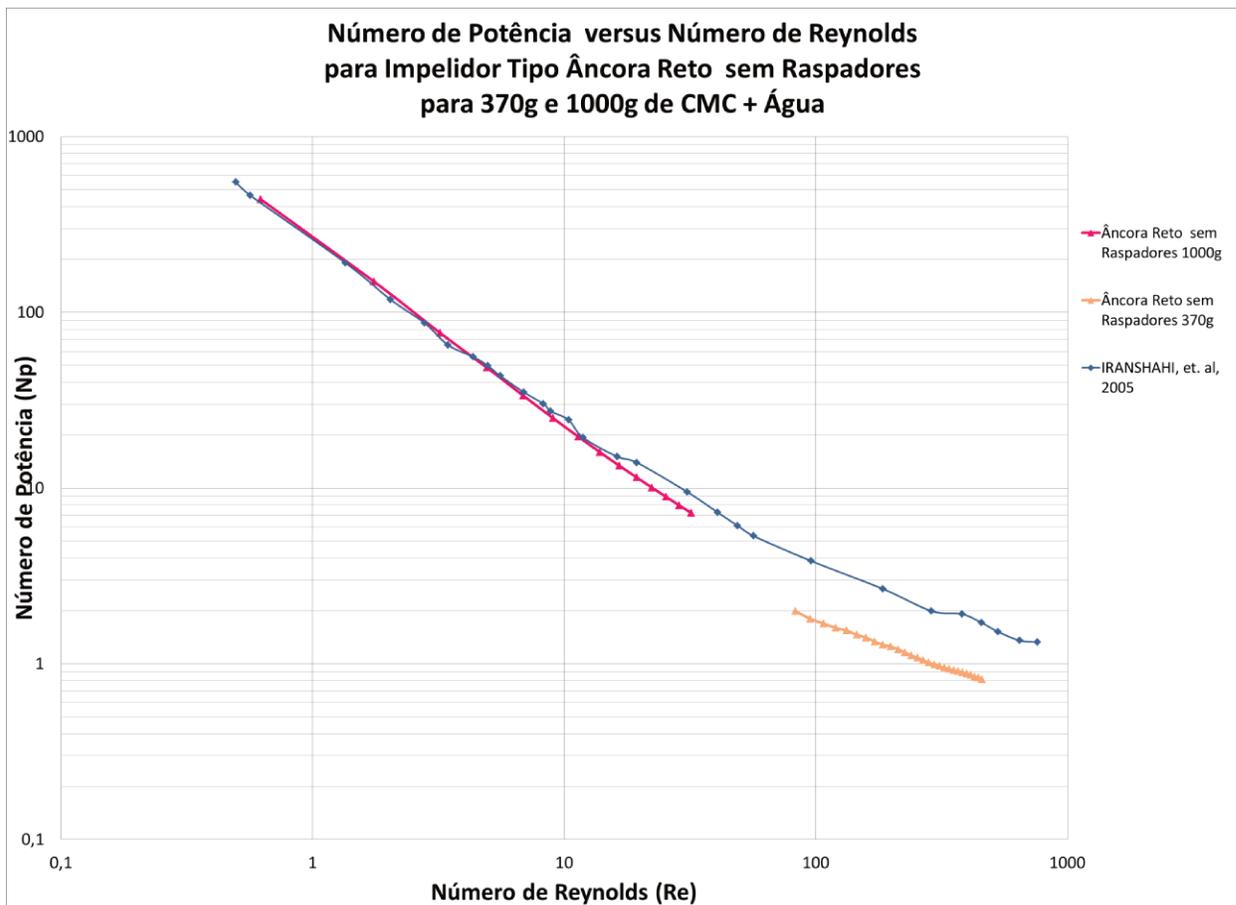


Figura 4.2 Curva de número de potência (Np) versus número de Reynolds (Re) para impelidor âncora reto sem raspadores.

Pode-se observar na Figura 4.2, que o impelidor âncora reta sem raspadores mostrou-se eficiente em sistemas de alta viscosidade operando em regime laminar porque apresenta a maior parte de suas utilizações na indústria, devido às suas altas viscosidades, e em regime de transição os dados não são próximos aos encontrados na literatura, pois este tipo de impelidor trabalha a baixa rotação devido à alta viscosidade do sistema de mistura utilizado.

Pode-se observar que uma diminuição da concentração do fluido gera uma menor viscosidade, ocasionando menor potencia consumida pelo impelidor e os dados obtidos se mostraram bastante satisfatórios, quando comparamos com a literatura (IRANSHAHI, et. al, 2005). Entretanto, notou-se que na obtenção de valores para o regime de transição foi necessária a

utilização de diversas soluções com concentrações diferentes, e estas causaram dificuldades na obtenção de uma curva contínua desde o regime laminar até regime de transição. Os pontos que eram claramente espúrios foram eliminados. Esta eliminação se justifica porque, quanto menos viscosa for a solução, menor a confiabilidade dos dados no regime laminar. Por exemplo, nenhum dado de literatura usa água para determinar o número de potência no regime laminar. Desta forma, quase que invariavelmente, o início das curvas presentes no regime de transição foram desprezados, sendo usado para o regime laminar puro somente soluções muito viscosas.

Sabe-se que os impelidores âncora são muito eficientes na agitação de fluidos muito viscosos por apresentarem um fluxo tangencial que evita a deposição de material próximo à parede e no fundo do tanque. No entanto, este tipo de agitador promove a movimentação do fluido que causa uma mistura do topo ao fundo do tanque muito baixo. O fluido se movimenta dentro do tanque, mas seus componentes não são efetivamente misturados.

Analisando a Figura 4.2, conclui-se que, para este sistema, a geometria do tanque com fundo toro esférico e o formato do impelidor âncora reto sem raspadores não apresentaram influência no consumo de potência do sistema. A curva de potência está muito próxima ao se comparar com a literatura.

4.2.3 Impelidor de tipo âncora reta com raspadores

A Figura 4.3, ilustra o comportamento do número de potência em função do número de Reynolds utilizando-se o impelidor âncora reta com raspadores no tanque de acrílico de 50L.

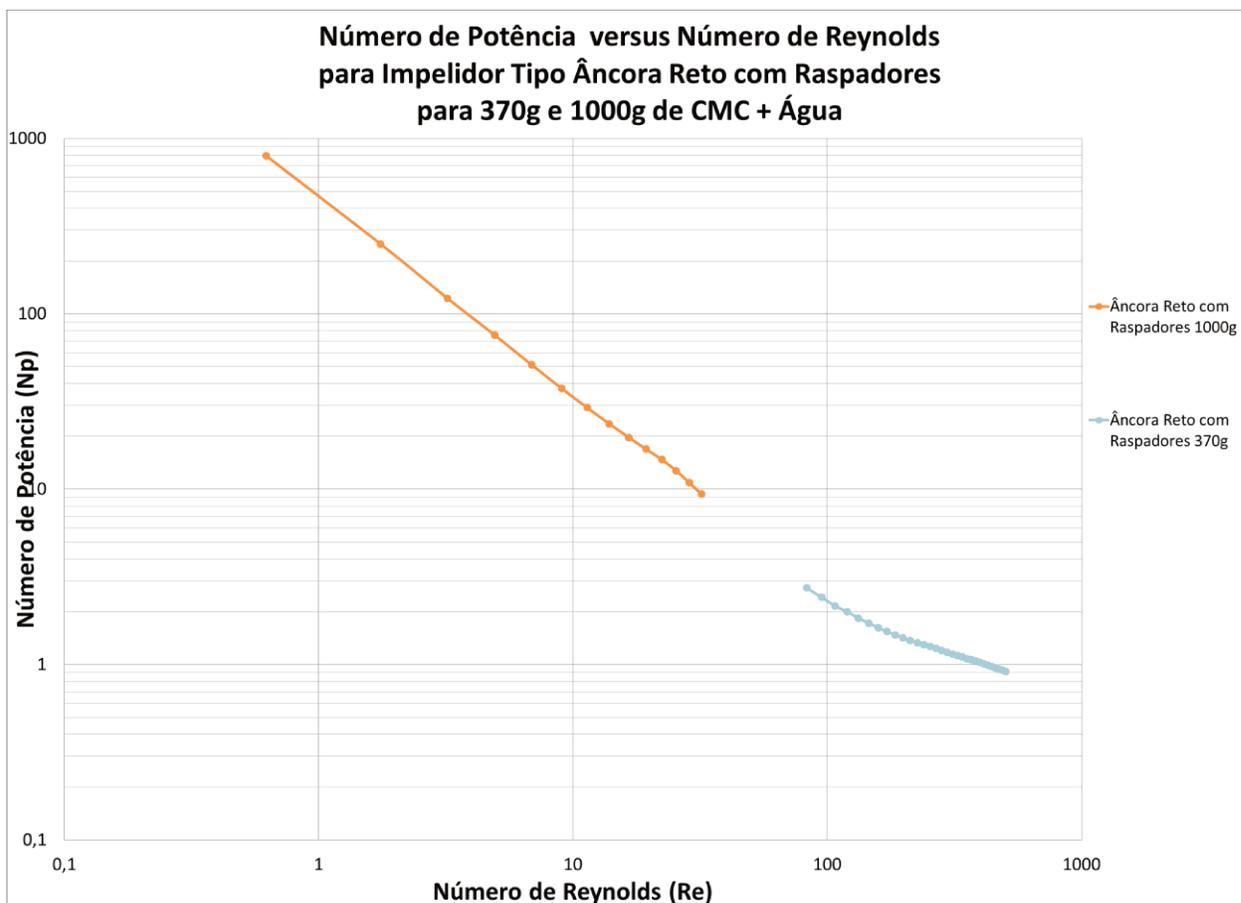


Figura 4.3 Curva de número de potência (N_p) versus número de Reynolds (Re) para impelidor âncora reto com raspadores.

Pode-se observar na Figura 4.3, que o impelidor âncora é um impelidor de proximidade, com diâmetro igual ao redor de 95% do diâmetro do tanque, o que promovia o contato entre os raspadores e as paredes do tanque durante os experimentos com velocidades altas, fazendo com que o torque e o consumo de potência obtida passassem a ter distorções que pode ser fator que gerou alguns desvios nos dados obtidos.

Verifica-se que os raspadores são utilizados quando há necessidade de se evitar a estagnação e a queima de produtos junto ao costado ou superfície de troca de calor. Devido ao atrito, a utilização de raspadores aumenta o consumo de potência.

4.2.4 Impelidor tipo âncora tubular com raspadores

A Figura 4.4 ilustra o comportamento do número de potência em função do número de Reynolds utilizando-se o impelidor âncora tubular com raspadores no tanque de acrílico de 50L.

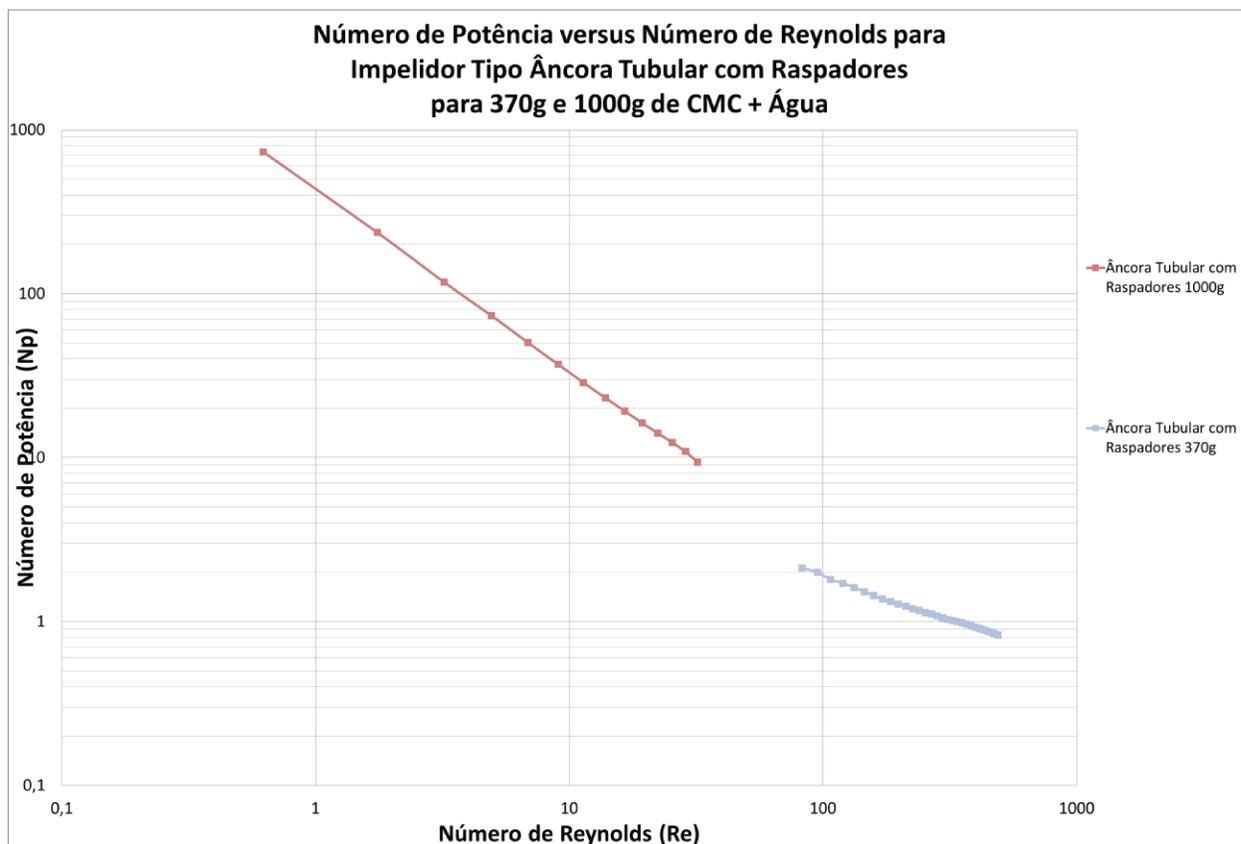


Figura 4.4 Curva de número de potência (N_p) versus número de Reynolds (Re) para impelidor âncora Tubular com raspadores.

A Figura 4.4, apresenta os resultados já citados no parágrafo anterior de número de potência em função do número de Reynolds para impelidor tipo âncora tubular com raspadores, verifica-se que na região laminar o número de potência aumenta à medida que o fluido se torna mais viscoso e que o número de potência diminuiu com o aumento do número de Reynolds.

Também se verifica que os raspadores são utilizados quando há necessidade de se evitar a estagnação e a queima de produtos junto ao costado ou superfície de troca de calor. Devido ao atrito, a utilização de raspadores aumenta o consumo de potência.

Como o diâmetro do impelidor se aproxima do diâmetro do tanque, o número de potência é menor devido a pouca presença de fluido entre a parede do tanque e a pá do impelidor, exigindo um esforço menor no sistema para empurrar o líquido.

4.2.5 Impelidor tipo âncora tubular sem raspadores

A Figura 4.5 ilustra o comportamento do número de potência em função do número de Reynolds utilizando-se o impelidor âncora tubular sem raspadores no tanque de acrílico de 50L.

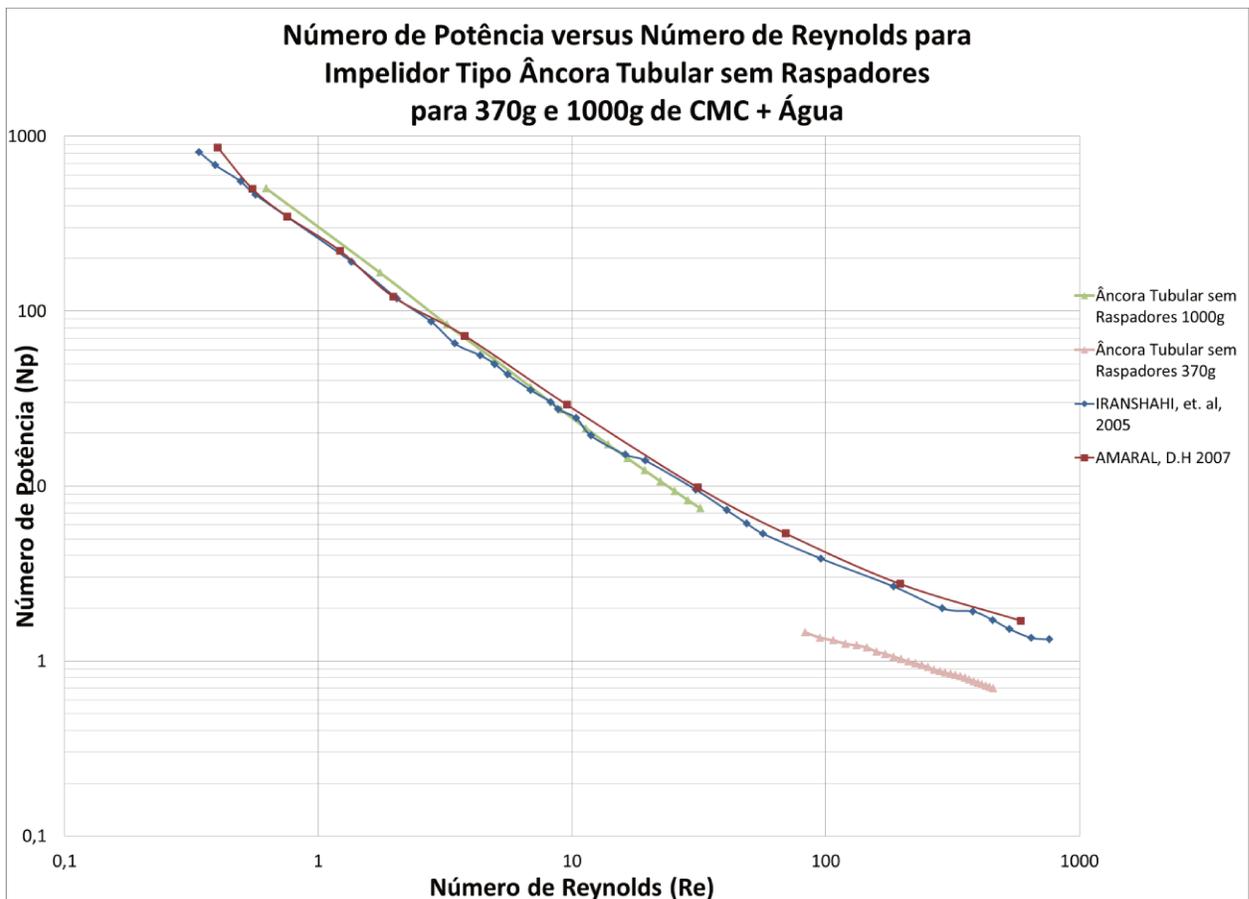


Figura 4.5 Curva de número de potência versus número de Reynolds para impelidor âncora Tubular sem raspadores.

Pode-se verificar na Figura 4.5, que com a diminuição de número de potência, ocorre o aumento do número de Reynolds e também que o impelidor âncora tubular sem raspadores apresenta um bom desempenho em regime laminar. Tal observação permite que se diga que para o regime de transição, a precisão das medições é consideravelmente variável em relação à literatura, e que os resultados podem não ser tão fiéis à realidade quanto para o regime laminar. O impelidor tipo âncora tubular sem raspadores mostrou-se eficiente em sistemas de alta viscosidade operando em regime laminar. Sua geometria é responsável pela formação de fluxos tangenciais, muito adequados em sistemas com alta transferência de calor.

4.3 Comparação entre curvas de potência para o impelidor tipo âncora reta com e sem raspadores

Para facilitar a visualização, é feita a comparação das curvas de potência para impelidores âncora reto com e sem raspadores em um mesmo gráfico, apresentado na Figura 4.6.

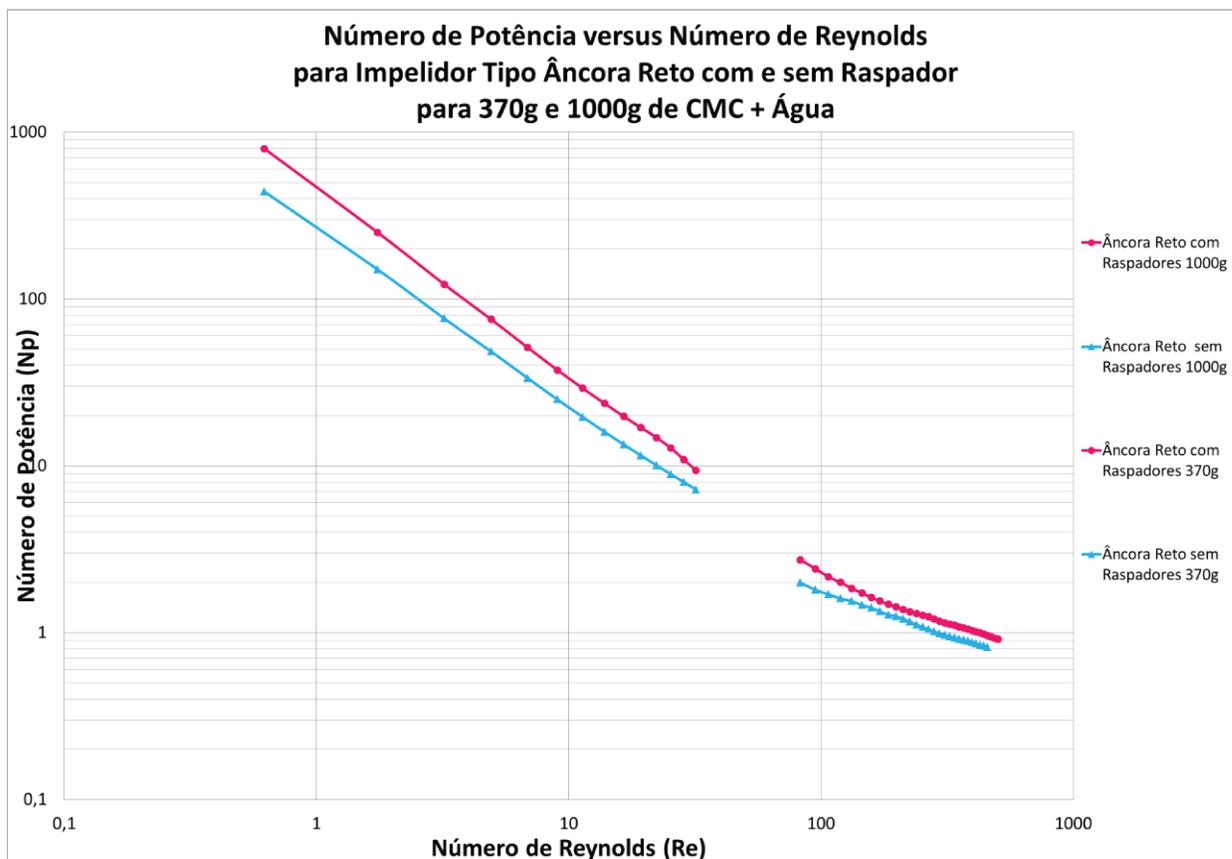


Figura 4.6 Comparação entre as curvas de potência de impelidor âncora reta com e sem raspadores.

Analisando a figura 4.6, conclui-se que, para este sistema (cmc + água) e para os impelidores âncora reta com e sem raspadores, pode-se observar que o impelidor que consome maior potência é o âncora reto com raspadores, como se esperava, devido a que o impelidor com raspadores faz mais esforço ao contato esporádico com as paredes do tanque. As curvas de potência estão muito próximas entre si e pode-se observar que no regime transição as curvas de

potência mudaram devido às altas rotações e ao problema com o equipamento como já mencionada na parte de âncora reta com raspadores.

4.4 Comparação entre curvas de potência para impelidor tipo âncora tubular com e sem raspadores.

A comparação das curvas de potência para impelidores tipo âncora tubular com e sem raspadores são apresentados no gráfico. Da Figura 4.7.

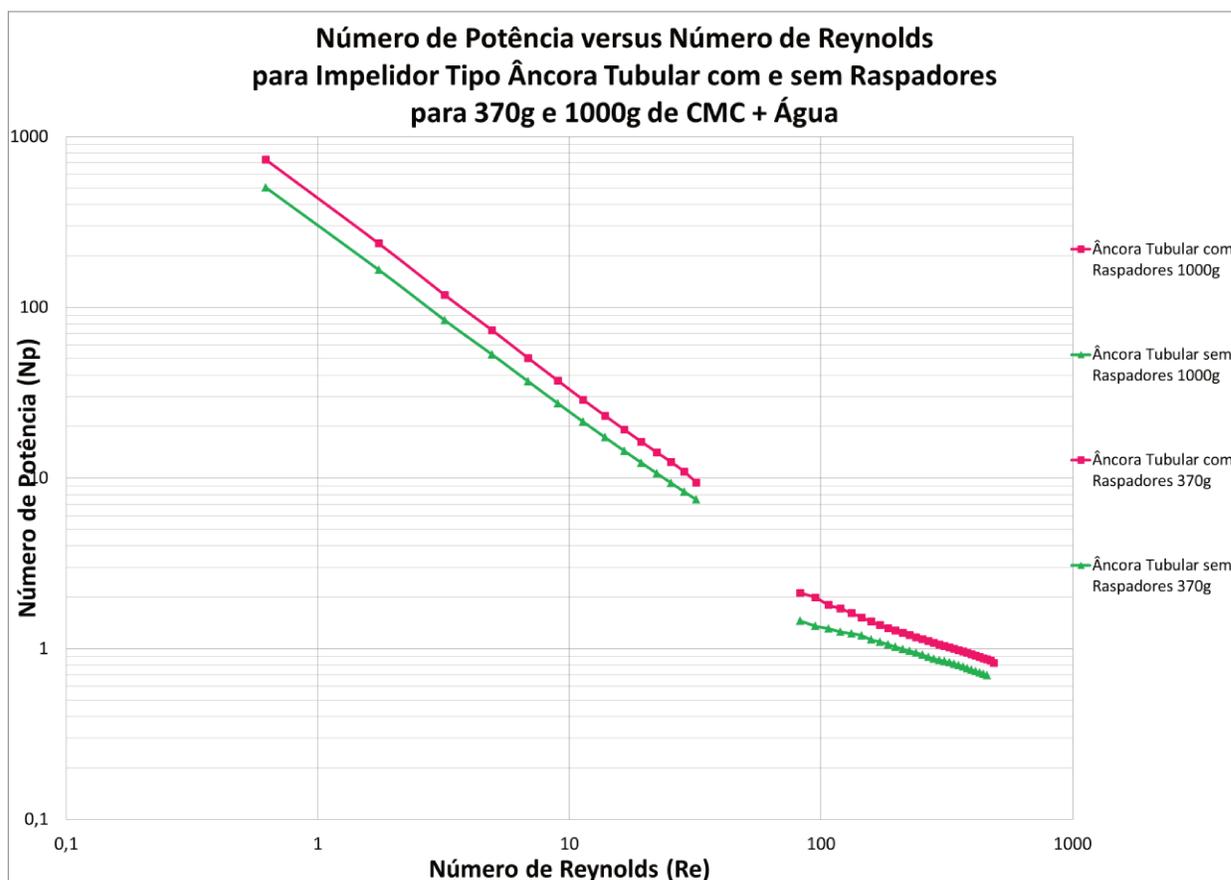


Figura 4.7 Comparação entre curvas de potência do impelidor âncora tubular com e sem raspadores.

Na Figura 4.7, pode-se observar que o impelidor que consumiu menor potência é o impelidor âncora tubular sem raspadores, devido ao fato de não possuírem raspadores e ao contato com o fluido, que é menor pela distância entre o impelidor e as paredes do tanque.

As curvas de potência para o impelidor âncora tubular com raspadores no regime laminar estão muito próximas entre si.

4.5 Comparação entre curvas de potência versus número de Reynolds para os cinco tipos de impelidores testados.

Para uma melhor visualização dos experimentos, foram comparadas as curvas de potência para os cinco impelidores testados.

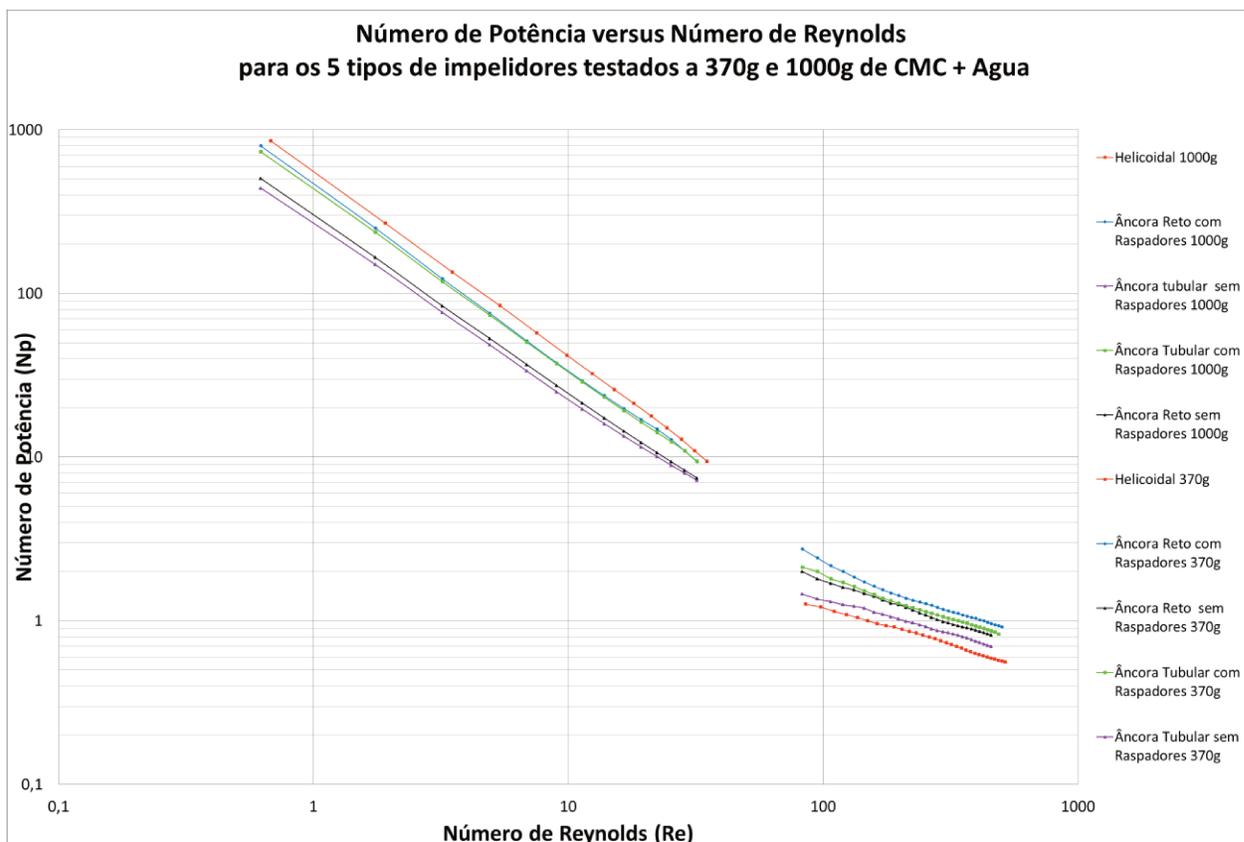


Figura 4.8 Comparação entre curvas de potência para os cinco tipos de impelidores.

Na Figura 4.8, pode-se observar que o impelidor helicoidal possui uma curva mais elevada de consumo de potência no regime laminar em relação aos impelidores âncora reta e âncora tubular com e sem raspadores. Este tipo de impelidor é muito mais largo e tem maior área global de arraste de fluido do que os impelidores testados, sendo assim muito mais difícil para o equipamento fornecer torque para que este impelidor possa agitar o fluido presente no tanque. Tal fato faz com que o impelidor necessite de maior torque, o que ocasiona um maior consumo de potência do sistema.

Somando-se estas constatações ao fato de que o impelidor helicoidal é um impelidor de proximidade, com diâmetro igual ou maior que 95% do diâmetro do tanque, tem-se que este chegava a encostar-se nas paredes do tanque ao ser agitado em velocidades mais altas, fazendo com que o torque e o consumo de potência obtido possam ter sofrido distorções no sistema.

Também se pôde verificar que os impelidores âncora reta com raspadores e âncora tubular com raspadores consumiram maiores potência com respeito aos impelidores âncoras sem raspadores devido à resistência que fazem os raspadores com as paredes do tanque, aumentando o consumo de potência, o que era esperado ao se comparar com a literatura.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

- ✓ Observando os resultados concluiu-se que a mistura de CMC + água comportou-se como fluido não-newtoniano e apropriada para os experimentos, muito embora apresentou instabilidade e drástica diminuição de viscosidade com o tempo.
- ✓ Foram obtidos com sucesso dados experimentais para um impelidor helicoidal, um impelidor âncora com lâmina plana com e sem raspadores e um impelidor helicoidal tipo tubular com e sem raspadores no regime laminar.
- ✓ Estes tipos de impelidores (proximidade) mostraram consumo de potência muito próximo aos valores da literatura para sistemas de alta viscosidade operando em regime laminar.
- ✓ Verificou-se que os resultados apresentados para regime laminar e regime de transição os impelidores âncora reta com raspadores e âncora tubular com raspadores consumiram maiores potência com respeito aos impelidores âncoras sem raspadores devido à resistência que fazem os raspadores com as paredes do tanque, aumentando o consumo de potência, o que era esperado ao se comparar com a literatura.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

A seguir, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros e a continuação de projetos de mistura.

- Construir uma seção cilíndrica em acrílico usinando um tarugo sólido para obter um cilindro com seção cilíndrica uniforme.
- Estudar a necessidade da compra de um motor de maior potência.
- Estudar outros possíveis fluidos não newtonianos.
- Testar diferentes molas para os raspadores, visto que, a força da mola transferida ao contato raspador e parede promove uma maior resistência ao deslocamento e pode influenciar no número de potência.
- Procurar alguma solução para que a troca dos impelidores seja mais fácil.

CAPÍTULO VI

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, D. H. **Modelo tridimensional para estudo do consumo de potência de agitadores tipo âncora com o uso da dinâmica dos fluidos computacional**, Universidade Estadual de Campinas. 2007.
- BARNES, H. A., HUTTON, J. F., WALTERS, K. **An introduction to rheology**, Elsevier, Amsterdam. 1989.
- BATTAGLINI, N. M. **Avaliação do comportamento de impelidores especiais em mistura de fluidos**; Botucatu, 1998.
- BIRD, R., STEWARD, W. LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. New York: Wiley, 1960.
- BOURNE, J. R., BUTLER, H. **Power consumption of helical ribbon impellers in viscous liquids**. Trans. Inst. Chem. Engrs., V.47, 1969.
- BOWEN, R. L. **Agitation intensity: key to scaling up flow – sensitive Liquid systems**. Chemical Engineering. 1985.
- BRASEQ. **Brasileira de Equipamentos Ltda. Viscosidade e Reologia: Noções básicas**. Disponível em Acesso em: 22 de outubro de 2009.
- CARREAU, P.J., CHHABRA, R.P., CHENG, J. **Effect of rheological properties on power consumption with helical ribbon agitators**. Alche Journal, v 39, 1993.

- CHAVAN, V. V., ULBRECHT, J. **Power correlations for close-clearance helical impellers in non-Newtonian liquids**; Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., vol. 12, 1973.
- CHENG, J., CARREAU, P. J., **Mixing in the transition flow regime with helical ribbon agitators**. The can J Chem Eng, v.72, 1994.
- DE MATOS ACQUARONE V. **Caracterização reológica de soluções de CMC: Viscoelasticidade e influência de características da molécula**. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. 1997. Tese de mestrado.
- DE OLIVEIRA JÚNIOR S., J. **Viscosímetro para fluidos não newtonianos**. Campinas: Departamento de Engenharia Mecânica, escola de politécnica da USP 1997.
- FERREIRA, Eliomar Evaristo; BRANDAO, Paulo Roberto Gomes; KLEIN, Bernhard and PERES, Antônio Eduardo Clark. **Reologia de suspensões minerais: uma revisão**. vol.58 (2005),
- GATES, L.E., HENLEY, T. L. **How to select the Optimum Turbine**. Chemical Engineering, 1975.
- GRANGEIRO DA SILVA, J. **Análise crítica das correlações e parâmetros fundamentais em sistemas de agitação**, faculdade de engenharia química, universidade estadual de campinas , 2002.
- HALL, K. R., GODFREY, J. C. **Power consumption by helical ribbon impellers**, **Trans. Instn. Chem. Engrs.**, vol. 48, 1970.
- HIXSON, A. W., LUEDEKE, V. E. **Ind. Eng. Chem.**, vol. 29, 1937.
- IRANSHAHI, A., HENICHE, M., TANGUY, P.A., YATOMI, R., MORINAGA, S. AND TAKENAKA, K. **Numerical investigation of 3D mixing hydrodynamics of Maxblend**,

Fourth International Conference on CFD in the Oil and Gas, Metallurgical & Process Industries, 2005.

- JOAQUIM JR., C. F., CEKINSKI, E., NUNHEZ, J. R., URENHA, L. C., **Agitação e mistura na indústria**. LTC, Rio de Janeiro, 2007.
- KAI, W., XIULIN, Z., ZUREN, P., **Velocity distribution and mixing time for the flow of highly viscoelastic fluids in the agitated vessel with the inner and outer helical ribbon-anchor impeller**; J. Chem. Ind. Eng., vol. 40, 1989.
- KELLER J.D. **Sodium carboxymethylcellulose (CMC)**. In: GLICKSMAN, M. Food Hydrocolloids. Boca Raton. Florida: CRC Press, Inc, 1982.
- KRESTA, S. M; WOOD, P.E. **The mean flow field produced by a 45° pitched blade turbine: changes in recirculation pattern due to off bottom clearance**. Can. J. chem. Eng., v 71, 1993.
- McCABE, W. L.,; SMITH, J.C. **Unit operations of chemical engineering**; International Student Edition; 2ª Ed.; McGraw-Hill Book Company. 1967.
- MICHELAN, R. **Influência do tipo de impelidor sobre o desempenho do reator anaeróbio em batelada seqüencial com biomassa granulada tratando esgoto sintético**. São Carlos, 2006.
- NAGATA, S. **Mixing – principles and applications kodansha scientific books**. 1975.
- NOMURA, T., HE, Y., TAKAHASHI, K., **Development and mixing characteristics of folding anchor impeller for round-bottomed flask**; J. Chem. Eng. Japan, vol. 29, 1996.
- OLDSHUE, J. M. Fluid Mixing Technology, chemical engineering –McGraw-Hill, first edition, 1983.

- PAUL, E. L., ATIEMO-ONBENG, V. A., KRESTA, S. M., **Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice**. Wiley Interscience, New Jersey, 2003.
- RONCHI, JR, A. **O estudo sobre as operações unitárias de agitação, troca de calor em tenques e mistura de pós**. São Carlos- (1997)
- SAIA, L. H. **Determinação experimental de consumo de potência de agitadores para líquidos de alta viscosidade**. Faculdade de Engenharia de Química, Universidade Estadual de Campinas, 2010. Relatório final.
- SHEKHAR, S,M; JAYANTI, S., **Mixing of pseudoplastic fluids using helical ribbon impellers**. AIChE journal, v 49. 2003
- SILVA, J. L. G., **Agitação e mistura na indústria de alimentos; SEMEALI; UEFS**, 2010.
- SPOGIS, N., NUNHEZ, J. R. **Design of a high-efficiency hydrofoil through the use of computational fluid dynamics and multiobjective optimization**. AIChE Journal, v.55, N° 7, 2009.
- STERBACEK, Z., TANSK, P. **Mixing in chemical industry**, Vol. 5, 1ª Ed, 1965
- UFPE. **Mecânica de Flúidos: Reologia**. Disponível em: Acesso em 22 de outubro de 2009.
- WANG, J. J., FENG, L. F., GU, X. P., WANG, K., HU, C. H., **Power consumption of inner-outer helical ribbon impellers in viscous Newtonian an non-Newtonian fluids**; Chem. Eng. Sci., vol. 55, 1999.

- WANG, J.-J. ;FENG, L.-F. ;GU, X.-P. ; WANG, K. ; Hu, C.-H., **Power consumption of inner-outer helical ribbon impellers in viscous Newtonian and Non-Newtonian fluids**. Chemical Engineering Science, V.55 2000.
- www.kroma.com.br