



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Influência dos impelidores e condições de mistura na produção de insumos químicos para o setor coureiro

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aluno: Tiago Luis de Martini
Orientador: Nilo Sérgio Medeiros Cardozo

Porto Alegre, dezembro de 2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Dr. Nilo Sérgio Medeiros Cardozo, pela paciência e insistência na continua melhoria no desenvolvimento e estruturação das idéias neste trabalho, e durante toda a graduação.

À empresa TFL do Brasil pelo suporte técnico.

Às famílias Peruzzo e Canesso, que tanto me apoiaram durante a graduação, me acolhendo como um próprio familiar.

À minha namorada Camila e sua família, pelo carinho, amizade e incentivo que sempre me deram.

Aos meus pais, Odorico e Silvia que sempre confiaram na minha formação, me dando incondicional apoio. Agradeço também pelos ensinamentos de vida que deles recebi, os quais o meio acadêmico não proporciona.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 MECANISMOS DE AÇÃO DE IMPELIDORES PARA MISTURA.....	3
2.2 NÚMEROS ADIMENSIONAIS TÍPICOS DE SISTEMAS DE AGITAÇÃO.....	5
2.3 COMPONENTES DE FLUXO GERADAS EM SISTEMAS DE AGITAÇÃO.....	6
2.4 CARACTERÍSTICAS DE IMPELIDORES UTILIZADOS NESTE TRABALHO.....	7
2.5 CHICANAS.....	9
2.6 MECANISMOS DE MISTURA.....	10
2.7 ASPECTOS ESPECÍFICOS DAS OPERAÇÕES DE DISPERSÕES.....	11
3. MATERIAIS E MÉTODOS	13
3.1 DEFINIÇÃO DOS PRODUTOS CRÍTICOS EM TERMOS DE PROCESSO DE MISTURA.....	13
3.2 SISTEMAS DE AGITAÇÃO TESTADOS.....	14
3.3 PROCEDIMENTO UTILIZADO NOS TESTES DE AGITAÇÃO REFERENTES A CADA LINHA DE PRODUTO.....	16
3.3.1 LINHA B.....	16
3.3.2 DISPERSÃO DE SÍLICA.....	16
3.3.3 EMULSÕES.....	17
3.3.4 LINHA BASE.....	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
4.1 LINHA B.....	20
4.2 DISPERSÃO DE SÍLICA.....	23
4.3 EMULSÕES.....	26
4.4 LINHA BASE.....	28
5. CONCLUSÕES	31
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	32
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

LISTA DE FIGURAS

2.1. IMPELIDORES: A) NAVAL; B) PÁ INCLINADA; C) ALTA EFICIÊNCIA; D) PÁ RETA; E) RUSHTON; F) PÁ DE PONTA; G) MOINHO DE COLÓIDES; H) DISCO CAWLES.....	4
2.2. DIAGRAMA DE FLUXO DE IMPELIDORES.....	4
2.3. LINHAS DE FLUXO CARACTERÍSTICAS DAS DIFERENTES COMPONENTES DE FLUXO: A) RADIAL; B) AXIAL; C) TANGENCIAL.....	6
2.4. POSICIONAMENTO DAS CHICANAS: A) INCLINADO; B) ESPAÇADO; C) JUNTO À PAREDE.....	9
2.5. CONCEITO DE MISTURA DISPERSIVA PELO DESLIZAMENTO DE CAMADAS.....	10
3.1. SISTEMA DE AGITAÇÃO.....	14
3.2. IMPELIDORES AVALIADOS: A) 4 PÁS DE 45°; B) HÉLICE NAVAL; C) DISCO CAWLES; D) 2 PÁS DE 10°; E) TURBINA RUSHTON; F) ALTA EFICIÊNCIA.....	15
4.1. ETAPAS DE HOMOGENEIZAÇÃO: A) ANTES DA ADIÇÃO DE ÁCIDO; B) IMEDIATAMENTE APÓS A ADIÇÃO DE ÁCIDO; C) ESTADO INTERMEDIÁRIO E D) ESTADO FINAL.....	20
4.2. PRESENÇA DE FASE SUPERIOR.....	22
4.3. A) PRESENÇA DE AR NO PRODUTO. B) PRODUTO APÓS 24H.....	23
4.4. A) PONTOS NÃO DISPERSOS. B) COMPLETA DISPERSÃO.....	25
4.5. ESTÁGIOS DE EMULSIONAMENTO: A) INICIAL; B) INTERMEDIÁRIO; C) FINAL.....	26
4.6. ESTÁGIOS DE MISTURA DO MÉTODO A: A) INICIAL; B) INTERMEDIÁRIO; C) FINAL.....	28
4.7. ESTÁGIOS DE MISTURA DO MÉTODO B: A) INICIAL; B) INTERMEDIÁRIO; C) FINAL.....	28

LISTA DE TABELAS

3.1. COMPARAÇÃO DOS DIFERENTES VALORES DE PRODUÇÃO.....	13
3.2. DIMENSÕES DA PLANTA E DO VAZO EXPERIMENTAL.....	14
4.1. VALORES OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA LINHA B.....	21
4.2. VALORES OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA DISPERSÃO DE SÍLICA...24	
4.3. VALORES OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA EMULSÕES.....	27
4.4. VALORES OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA LINHA BASE.....	29

RESUMO

O presente estudo visa a análise e melhoria nos processos de agitação da empresa TFL do Brasil. Esta possui um grande escopo de produtos químicos e respectivos processos de obtenção, os quais foram agrupados por similaridades, formando linhas de produto. Essas linhas de produtos possuem um vaso de produção com geometria definida e apenas com possibilidade de melhoria nos demais componentes do sistema de agitação. Um estudo dos processos de mistura, característica de impelidores e seus fluxos gerados, bem como uma prévia análise dos processos em particular foram feitos para se ter uma base dos conceitos envolvidos, principalmente no que se refere a fluxos de bombeamento e cisalhamento. Os impelidores e demais componentes de agitação, exceto o tanque, foram avaliados para as 4 linhas de produtos consideradas críticas pelos critérios estabelecidos. Para tal fim foram realizados experimentos nas linhas de emulsão, Linha B, dispersão de sílica e linha base. Os testes de bancada foram realizados numa relação de redução geométrica idêntica a presente na planta em estudo, sendo que os tempos de homogeneização foram verificados por métodos visuais de verificação internos da empresa. Neles foram variados os formatos dos impelidores, bem como as velocidades de rotação e presença de chicanas. Para cada experimento, o objetivo principal foi à determinação do tempo mínimo de processo de homogeneização, o qual identificava o melhor impelidor dos envolvidos no estudo. Para cada linha de produto avaliada e o resultado encontrado foi sugerida uma modificação no processo industrial ou apenas uma verificação da correta utilização do atual impelidor. Em dispersões são necessários impelidores com maior característica cisalhante e em líquidos miscíveis características de bombeamento.

1. INTRODUÇÃO

As indústrias que fornecem produtos químicos para indústrias de couro são caracterizadas por um leque muito extenso de produtos químicos, já que cada etapa da transformação da pele em couro acabado exige características químicas específicas, alcançadas por produtos altamente variados.

Além disso, o mercado atualmente exige que as indústrias que atuam como fornecedoras de insumos para o segmento coureiro possuam a totalidade de suprimentos requeridos pelas empresas deste setor, a fim de garantir o atendimento a todas as necessidades do cliente em todas as etapas do processo de curtimento, fator determinante para manter-se competitivo no mercado.

Outra observação relevante com relação a este aspecto é o grande intercâmbio de mercados, imposto pela internacionalização das indústrias químicas, que faz uma empresa não poder limitar-se à atuação no mercado nacional.

Os mercados externos são consumidores em crescente potencial, aumentando assim a quantidade de exigências nos produtos e ampliando suas variações. Nesse sentido, para cada etapa considerada do processo de curtimento tem-se que disponibilizar produtos químicos que satisfaçam a necessidade de diferentes mercados.

Em função dos aspectos mencionados acima, as empresas fornecedoras de insumos para o segmento coureiro trabalham com portfólios que envolvem em torno de 200 produtos diferentes. Em função da diversidade de artigos produzidos e da inviabilidade de dispor de equipamentos específicos para cada um deles, a flexibilidade dos processos utilizados por este tipo de indústria é um fator de suma importância.

Nesse sentido, para este estudo foram agrupados em linhas de produtos com similaridades, para que a otimização dos processos de mistura forneçam resultados representativos em um universo mais amplo. Os produtos com características semelhantes foram estudados em conjunto, formando-se assim quatro linhas de estudo, sendo elas: emulsão, linha B, dispersão de sílica e linha base.

É neste contexto que se insere o presente trabalho, no qual os aspectos de flexibilidade e adaptabilidade de processos a produtos são contemplados com base na análise específica de processos de mistura utilizados para produção de insumos químicos para as etapas de ribeira e de acabamento do curtimento de couros, na empresa TFL do Brasil, a qual o estudo foi realizado.

Os processos que constituirão a base de estudo, cujas características principais serão apresentadas na Secção 3.2, são processos para os quais a geometria dos vasos de mistura já está definida, de modo que a melhoria ou otimização da operação de mistura estará relacionada principalmente com a seleção dos componentes de agitação e/ou procedimentos de produção.

Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi analisar a eficiência e/ou a possibilidade de melhorias nos processos de mistura analisados, levando em conta os seguintes parâmetros: posição e tipo do impelidor usado, presença de chicanas e procedimento de produção.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados alguns conceitos básicos necessários para a melhor compreensão dos tópicos que serão discutidos posteriormente nas seções de metodologia e de discussão dos resultados, além de uma revisão sobre os sistemas de mistura aplicados aos produtos em estudo e algumas características dos impelidores, forças e fluxos por eles gerados.

2.1. MECANISMOS DE AÇÃO DE IMPELIDORES PARA MISTURA

Na dinâmica de fluidos são encontradas tanto forças superficiais quanto de massa. As superficiais atuam nas fronteiras de um meio através do contato direto. As forças desenvolvidas sem contato físico e distribuídas por todo volume do fluido são denominadas de forças de massa, como exemplo as forças gravitacionais (Fox, 1992).

Quando se considera a atuação de impelidores em sistemas de agitação, as forças de superfície são as forças de interesse, sendo que forças superficiais normais são aquelas que geram característica de bombeamento no sistema, enquanto as forças superficiais de cisalhamento estão relacionadas com a ação de mistura dispersiva.

Dependendo do objetivo do processo de mistura, é necessário dar prioridade ao cisalhamento ou bombeamento. O bombeamento é definido como a quantidade de material descarregado por um impelidor rotativo, sendo que a vazão volumétrica gerada pelo impelidor é proporcional a velocidade de rotação e ao cubo do diâmetro do impelidor. A ação de cisalhamento gerada por um impelidor depende da intensidade dos gradientes locais de velocidade que este é capaz de gerar. Como, para uma dada geometria do impelidor, o gradiente de velocidades é proporcional a velocidade de rotação, a ação de cisalhamento aumenta quando aumenta a velocidade de giro do agitador. Em regiões que se afastam do impelidor as tensões de cisalhamento são menores pela redução dos gradientes locais de velocidade (Junior *et al*, 2007).

A análise dos gradientes de velocidades gerados por uma dada geometria de impelidor e das contribuições relativas de ação de bombeamento e cisalhamento gerados por um dado

agitador é bastante complexa, pois se necessita obter o coeficiente angular do perfil de velocidades. Conseqüentemente, este tipo de análise envolve geralmente a utilização de dados experimentais e/ou a utilização a fluidodinâmica computacional.

Nas Figuras 2.1a-h e 2.2 apresentam-se, respectivamente, alguns tipos usuais de impelidores e as intensidades relativas (representadas por porcentagem de característica de cada ação em particular) das ações de bombeamento e cisalhamento destes impelidores (Fasano et al, 1994).

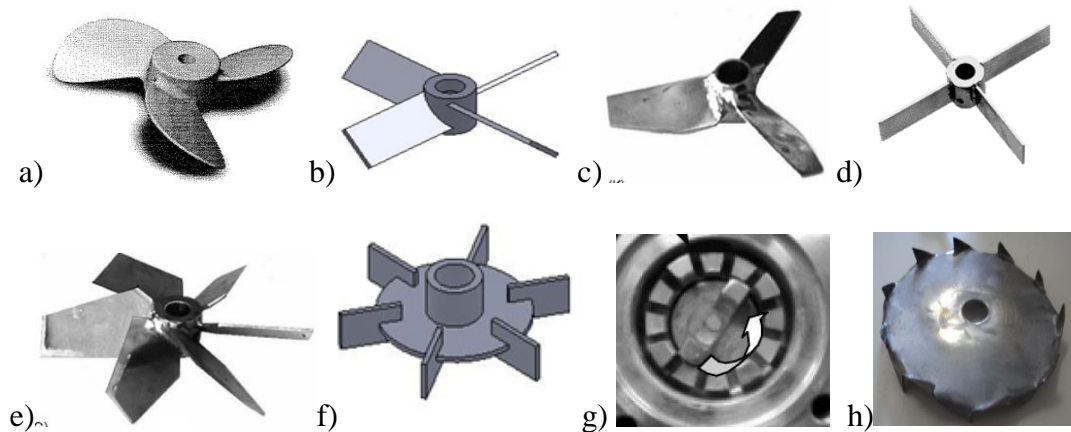


Figura 2.1. Impelidores: a) Naval; b) Pá inclinada; c) Alta eficiência; d) Pá reta; e) Rushton; f) Pá de ponta; g) Moinho de colóides; h) Disco Cawles.

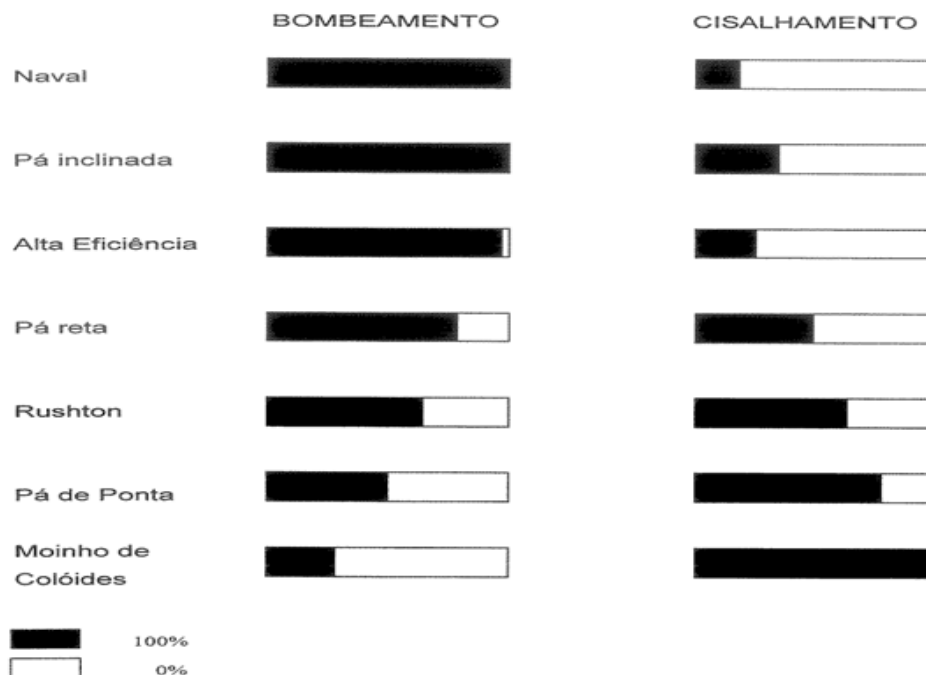


Figura 2.2: Diagrama de fluxo de impelidores, segundo Fasano et al, (1994).

2.2. NÚMEROS ADIMENSIONAIS TÍPICOS DE SISTEMAS DE AGITAÇÃO

Há uma série de números adimensionais relacionados a sistemas de agitação, dentre os mais importantes, podemos citar o Número de Froude, o Número de Reynolds, Número de Bombeamento e o Número de Potência (McCabe *et al*, 2005).

O Número de Reynolds para sistemas de agitação é definido pela Eq. 2.1:

$$N_{RE} = \rho \cdot N \cdot D^2 / \mu \quad (2.1)$$

onde D é o diâmetro do impelidor em metros, N é a rotação do eixo em rotações por segundo (rps), μ é a viscosidade em kg/(s.m) e ρ a densidade em kg/m³. Este número representa a razão entre as forças inerciais causadas pelo movimento e as forças viscosas do fluido. Escoamentos em tanques de mistura com Número de Reynolds até 10 são considerados laminares, na faixa entre 10 e 10.000 são considerados escoamentos na zona de transição e acima deste valor são considerados turbulentos (Perry, 1997).

O Número de Froude (N_{FR}) relaciona as forças inerciais e as forças gravitacionais que agem sobre o sistema. É usado para considerar os efeitos de superfície livre do fluido como o vórtice central, encontrado em sistemas sem chicanas. Sua fórmula pode ser descrita pela Eq. 2.2, sendo N a rotação do eixo em rps, D o diâmetro do impelidor e g a aceleração da gravidade em m/s².

$$N_{FR} = N^2 \cdot D / g \quad (2.2)$$

O número de bombeamento (N_{BO}) é definido como a razão entre o bombeamento efetivo do impelidor, medido pela vazão que este gera (Q), e a vazão máxima teórica que com ele poderia ser obtida ($N \cdot D^3$):

$$N_{BO} = Q / N \cdot D^3 \quad (2.3)$$

O número de potência (N_P) representa a relação existente entre a força de arraste das pás do impelidor e as forças de inércia do sistema. Este número está diretamente ligado com a potência consumida pelo impelidor, sendo que quanto maior seu valor maior o consumo de

energia. Seu valor decai com o aumento do N_{RE} até se tornar constante no regime turbulento. É função do tipo de fluxo dentro do misturador e das proporções geométricas do equipamento. É obtido diferentemente para o regime laminar e turbulento de acordo com as respectivas equações 2.4 e 2.5.

Para regime laminar,

$$Np = P / \rho \cdot N^3 \cdot D^5 \quad (2.4)$$

Para regime turbulento,

$$Np = P / \mu \cdot N^2 \cdot D^3 \quad (2.5)$$

onde P é a potência do agitador, ρ é a densidade do fluido, μ a viscosidade, N a rotação por segundo e D o diâmetro do impelidor.

2.3. COMPONENTES DE FLUXO GERADAS EM SISTEMAS DE AGITAÇÃO

Devido às forças mencionadas anteriormente, um sistema de agitação pode apresentar, em geral, as três componentes básicas de fluxo: axial, tangencial e radial. Estas componentes, representadas esquematicamente na Figura 2.3, podem ser da mesma magnitude ou haver predomínio de alguma delas.

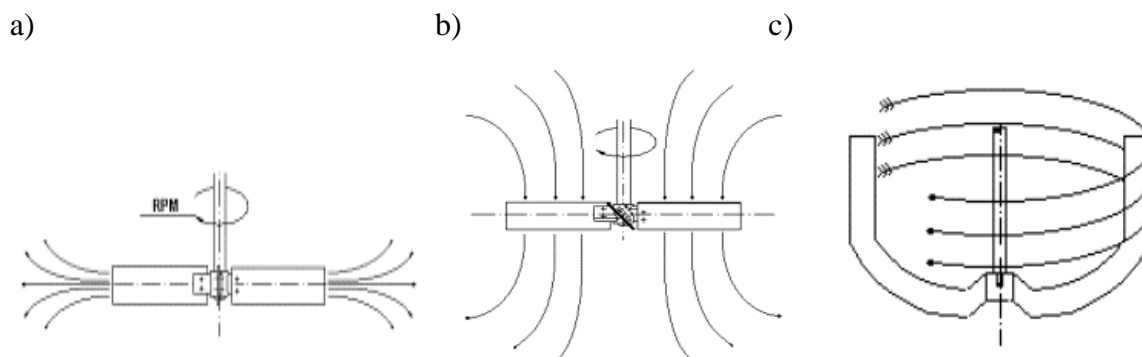


Figura 2.3. Linhas de fluxo características das diferentes componentes de fluxo: a) Radial; b) Axial; c) Tangencial.

O fluxo radial impulsiona o volume de fluido contra as paredes do tanque, caracterizando-se por alto consumo de energia, alto cisalhamento e, portanto, alta capacidade

dispersiva. Em função do elevado cisalhamento gerado, impelidores com elevados valores da componente de fluxo radial podem apresentar maior agressividade ao produto, dependendo das características deste. Normalmente são aplicados em processos em que se requeiram ações dispersivas, tais como dispersão gasosa, transferência de massa, dissolução de materiais sólidos agregados e mistura em tanques com baixo nível de líquido.

O fluxo axial impulsiona a massa líquida para o fundo do tanque. Os impelidores com predominância deste tipo de fluxo apresentam menor consumo de energia e geram um bom nível de mistura distributiva em todo o volume do tanque de mistura, diminuindo a incidência de zonas estagnadas, principalmente na presença de chicanas. Também se caracterizam por apresentarem baixa agressividade aos produtos. São os impelidores aplicados na maioria dos processos agitados, tais como mistura de produtos líquidos, sólidos em suspensão e transferência de calor.

Os impelidores com predominância de fluxo tangencial operam preferencialmente em regime laminar, sendo destinados a misturar produtos com alta viscosidade, normalmente acima de 50 Pa.s. Não produzem considerável movimento radial ou axial, mas sim, impulsionam a massa a um movimento circular paralelo à parede do tanque de mistura. Devido às suas características, são impelidores de alto consumo de energia e, por operarem com baixas rotações, exigem acionamentos de alto torque e, por conseguinte, de alto custo de investimento.

2.4. CARACTERÍSTICAS DE IMPELIDORES UTILIZADOS NESTE TRABALHO

Os impelidores são os responsáveis pelos padrões de fluxo nos vasos. São classificados de acordo com o regime de mistura, sendo seus diâmetros e outras características geométricas responsáveis pela caracterização do fluxo gerado e capacidade de mistura. Aqui, em função das opções atualmente utilizadas na empresa TFL onde foi realizado este trabalho, os seguintes tipos de impelidores foram considerados: impelidor de alta eficiência, turbina Rushton, hélice naval, disco cawles e o de 4 pás com 45°.

O impelidor de alta eficiência (Figura 2.1c) é assim chamado por produzir fluxo com característica de muitos agitadores maiores, sem acréscimo de peso ou a perda de eficiência no bombeamento. Permite o uso de diâmetros maiores em tanques mais fundos, solucionando os problemas de velocidade crítica, que é aquela na qual ocorre vibração do eixo em

ressonância com a vibração natural do sistema de agitação. Em regimes turbulentos seu N_p varia de 0,3 a 0,65. Possuem também um bombeamento altamente axial, com baixíssimo grau de cisalhamento. Este impelidor é aconselhado para operações em misturas simples e com sólidos em suspensão, atuando em meios com viscosidade de até 5 Pa.s.

A turbina Rushton (Figura 2.1f) é muito eficiente para dispersão de líquidos imiscíveis ou gases em baixas concentrações. A rotação do impelidor produz um fluxo intenso na direção radial, dividindo a região da parede em duas recirculações distintas, uma acima e outra abaixo do impelidor. Sua geometria também é responsável pela criação de dois vórtices muito fortes atrás de cada lâmina. Estas áreas de alta turbulência são responsáveis pela quebra de bolhas e gotículas grandes em menores. A grande desvantagem deste impelidor é seu grande consumo de energia, sendo que seu N_p varia de 4.7 a 5.2.

O impelidor hélice naval (Figura 2.1a) possui formato de pás navais, cujo fluxo predominante é o axial. Suas pás são segmentos da superfície helicoidal gerada por uma curva helicóide, que possuem passo constante e ângulo de inclinação infinitamente variável, desde o cubo até a extremidade das pás. A utilização característica deste tipo de impelidor é em líquidos de baixa viscosidade e sistemas de agitação de pequeno porte, devido à sua capacidade de operar em altas rotações.

O impelidor Cawles (Figura 2.1h) é um disco com dentes angulares localizados na periferia, o que faz dele um impelidor de alto cisalhamento. É utilizado em dispersões a alta velocidade, como pigmentos em tintas e emulsões. Pelo fato da mistura neste tipo de impelidor ser gerada basicamente por cisalhamento, a sua eficiência de mistura aumenta proporcionalmente com a viscosidade dos fluidos processados (Dietsche, 1998).

Os impelidores de 4 pás com inclinação de 45° (Figura 2.1b) são os mais utilizados na indústria. Geram um fluxo do tipo axial, possuindo um custo de operação razoavelmente elevado em fluxos tanto turbulento quanto laminar. É muito utilizado para aplicações com alta variação de viscosidade, tendo uma excelente capacidade de bombeamento, causando variação do regime em curtos intervalos de tempo. Possui também um bom desempenho para suspensão de sólidos.

2.5. CHICANAS

As chicanas são geralmente placas planas na direção longitudinal do tanque, posicionadas junto à parede deste, ou próximo a ela com fixação por uma haste, com o objetivo de evitar a formação de um vórtice central pelo contato com o fluído, redirecionando suas linhas de fluxo.

Os vórtices são formados pela rotação do fluido como se fosse um corpo sólido, apresentando um nível de mistura reduzido. Para evitar tal fenômeno utilizam-se chicanas aumentando a transferência de potência para o fluido, convertendo o movimento circular em fluxo axial.

Aumentando a rotação do impelidor aumenta a intensidade do vórtice. Aumentando-se a viscosidade do fluido, a necessidade de uso de chicanas diminui, sendo que em altas viscosidades a largura da chicana pode estar em valores da ordem de $1/20$ do diâmetro do tanque.

Em líquidos viscosos, as chicanas também podem ser posicionadas numa distância da parede igual a sua largura (Figura 2.4b) para que exista fluxo de líquido na borda do tanque, evitando regiões mortas. Também existe a possibilidade de se utilizar chicanas com um ângulo favorável ao fluxo (Figura 2.4a), diminuindo a resistência ao movimento. Abaixo, a Figura 2.4 relaciona o posicionamento mencionado das chicanas com a faixa de viscosidade do fluido, onde para fluidos com alta viscosidade utiliza-se a geometria 2.4a e para fluidos com baixa viscosidade, utiliza-se a geometria 2.4c.

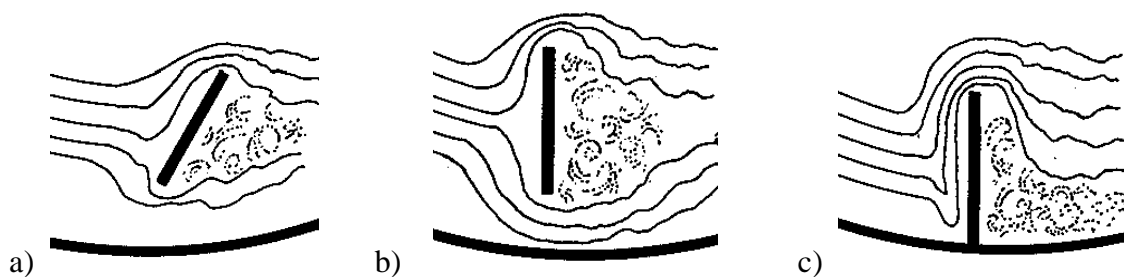


Figura 2.4. Posicionamento das chicanas: a) Inclinado; b) Espaçado; c) Junto à parede.

Dentre as desvantagens da presença de vórtice podemos citar a incorporação de ar, sendo que em certos processos este ar leva à formação de espuma e prejudica os controles eletrônicos de operação. Se o vórtice for grande ao ponto de atingir a superfície inferior do impelidor, podem surgir vibrações no eixo. Destaca-se também a redução na capacidade de

cisalhamento entre o impelidor e o fluido devido ao movimento ser circular. Em altas rotações e onde não existe uma superfície livre de tanque, o líquido pode transbordar do tanque.

Segundo Hicks *et al*, (1976) o critério para uso de chicanas é estabelecido pelo volume do tanque e a viscosidade do fluido agitado: para tanques com volume menor que $4,5\text{m}^3$ usa-se chicanas para viscosidades abaixo de $2,5\text{ Pa}\cdot\text{s}$ e para volumes superiores usa-se as chicanas em viscosidade abaixo de $5\text{ Pa}\cdot\text{s}$.

2.6. MECANISMOS DE MISTURA

Os mecanismos de mistura são fundamentados em três tipos de processos de mistura: distributiva, dispersiva e difusiva. A primeira é ocasionada devido à convecção forçada e reduz as não homogeneidades grosseiras em um meio, sem o rompimento de estruturas, estando relacionada principalmente com as forças de bombeamento. A mistura dispersiva é a etapa onde as não homogeneidades são eliminadas devido à força de cisalhamento existente entre as camadas rompendo a estrutura de partículas e aglomerados. Já a etapa difusiva esta presente a nível molecular e depende do coeficiente de difusividade dos meios.

Assim, na mistura de líquidos miscíveis é necessário existir dois elementos: um fluxo convectivo de modo que não existam regiões estagnadas dentro de um recipiente e uma região com presença de cisalhamento para reduzir as não homogeneidades do volume.

De acordo com a intensidade dos fluxos o regime de mistura pode ser laminar ou turbulento. O regime laminar dificulta a distribuição por apresentar somente componentes de fluxo coincidentes com o fluxo principal, porém é efetivo para produzir ação dispersiva devido à maior intensidade de cisalhamento. Assim, em regime laminar em um vaso cilíndrico, cada revolução do impelidor conduz a uma redução dos elementos de fluido vizinhos, diminuindo as dimensões do elemento, gerando uma dispersão efetiva (Figura 2.5).

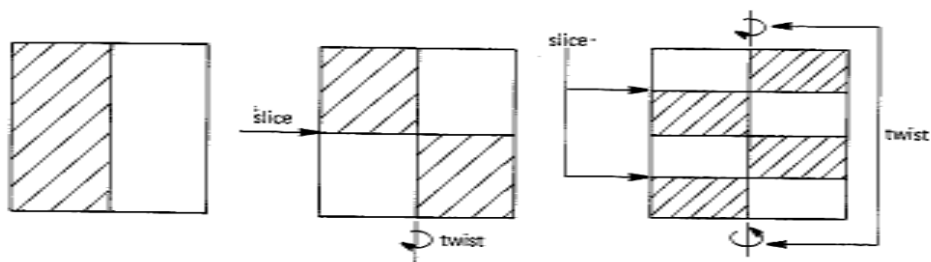


Figura 2.5: Conceito de mistura dispersiva pelo deslizamento de camadas.

Em regime turbulento, a ação distributiva provoca um aumento significativo dos gradientes locais de concentração em regiões próximas ao impelidor. Isto faz a mistura se dar mais rapidamente do que em regime laminar, quando se considera um processo de mistura de líquidos miscíveis. No entanto, quando o objetivo é a dispersão de fases imiscíveis uma combinação de ação distributiva e dispersiva é requerida

Ainda, para componentes de diferentes densidades e viscosidades temos dois tipos de controle de mistura: pela agitação ou pela gravidade. O controle pela agitação consiste no predomínio das forças exercidas pelo impelidor sobre as forças gravitacionais, fazendo que o fluido siga o padrão de escoamento definido pelo movimento do agitador e não desça ou suba devido às forças gravitacional ou de empuxo, respectivamente. O controle pela gravidade corresponde à situação inversa, na qual predominam as forças da gravidade e o empuxo. O controle pela agitação pode se dar a nível local, quando o líquido é adicionado perto do agitador, fazendo que o cisalhamento atue no líquido antes que as forças de empuxo o desloquem ao topo ou o fundo do misturador, ou global, quando a agitação é vigorosa. Os tempos de mistura do regime gravitacional são aproximadamente 10 vezes maiores que o regime controlado pela agitação (Bouwman *et al.*, 1997).

2.7. ASPECTOS ESPECÍFICOS DAS OPERAÇÕES DE DISPERSÕES

Ao se tratar de operações de mistura que consistem na produção de dispersão de sólidos ou de emulsões, surgem alguns aspectos adicionais a serem considerados além daqueles discutidos na Seção 2.6. Estes aspectos serão apresentados a seguir.

Com relação à dispersão de sólidos, no âmbito deste trabalho a atenção estará focada especificamente nas dispersões de sílica em água. Na empresa, na qual foi desenvolvido o presente trabalho, a sílica é empregada em compostos de acabamento, e para sua produção, se faz necessária sua dispersão de forma eficiente. Para alcançar esses efeitos, a sílica ativa deve se encontrar desaglomerada e dispersa, expondo assim toda a sua superfície reativa, além de possibilitar que suas partículas preencham os espaços vazios no empacotamento. No entanto, devido ao processo de densificação a que normalmente são submetidas, suas partículas se encontram fortemente unidas, podendo resultar, inclusive, em aglomerados macroscópicos que não se rompem com facilidade mesmo após cisalhamento intenso (Romano *et al.*, 2008).

Duas etapas críticas na dispersão do pó de sílica que merecem atenção são a molhagem e a quebra dos agregados e aglomerados formados pelas forças interparticulares.

A molhagem consiste nos processos de recobrimento de pequenos aglomerados de sílica e sua separação do resto de seu pó que ocorre na superfície livre do líquido no momento da adição do material e na absorção de água nos interstícios dos aglomerados de sílica. Esse processo é regulado por propriedades internas e externas da superfície do aglomerado, das propriedades do líquido, da dimensão dos aglomerados e da natureza das forças dinâmicas do fluido no processo.

Depois de molhada a sílica necessita da quebra dos aglomerados. Essa ruptura é ocasionada pelo cisalhamento ou impacto proporcionado pela agitação. Quando o aglomerado é submetido ao fluxo, as camadas que o envolvem tendem a deslizar quebrando o aglomerado, e assim sucessivamente até ser atingido o estágio de dispersão total. O aumento da viscosidade acentua a eficiência da quebra por cisalhamento por aumentar a resistência ao arraste viscoso.

Segundo Romano *et al* (2008), o impelidor radial, de cisalhamento intenso, produz uma dispersão mais eficiente que os impelidores tipo hélice, com caráter de bombeamento. Esse cisalhamento também reduz os tamanhos de partícula em aproximadamente cinco vezes em relação ao tamanho inicial.

Já no processo de emulsão, que é definido como uma dispersão de líquidos imiscíveis, ocorrem algumas complicações adicionais relacionadas ao fato de que as emulsões geralmente apresentam comportamento não newtoniano. Suas propriedades dependem da reologia e da estabilidade entre os meios.

Quando submetidas à ação do agitador, as gotas dispersas tendem a movimentar-se circularmente em sua própria estrutura e alinhar-se ao fluxo alongando-se e armazenando energia, gerando a característica pseudoplástica e viscoelástica. Apresentam rompimento e coalescência de gotas simultâneos, causados pelas tensões interfaciais existentes no sistema. Para diminuir-se a heterogeneidade das fases presentes deve-se proporcionar uma máxima diminuição do tamanho de gota da fase dispersa. Essa quebra é proporcionada pela tensão de cisalhamento que primeiramente modifica a geometria da gota, criando um alongamento que rompe ao atingir uma tensão de superfície máxima. Nesse contexto, impelidores com maior característica de cisalhamento e rotações elevadas aumentam a eficiência do processo de emulsão. Também a presença de chicanas é indicada, apesar de aumentar o consumo de potência do sistema.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. DEFINIÇÃO DOS PRODUTOS CRÍTICOS EM TERMOS DE PROCESSO DE MISTURA

Devido a impossibilidade de otimizar os processos produtivos para cada um dos 200 compostos produzidos pela empresa, estes foram primeiramente agrupados em função das semelhanças em sua composição. Assim, resultou a seguinte divisão: emulsões, dispersão de sílica, linha base e linha B. A linha base é uma gama de produtos de acabamento usados como veículo para tingimento. As emulsões em questão são basicamente emulsões óleo/água usadas na formulação da linha base ou para comercialização direta. A dispersão de sílica é realizada na composição da linha base, conforme descrito na Seção 2.7. A linha B é um detergente para uso em processos de ribeira.

Posteriormente, escolheram-se as linhas críticas a partir do seu custo de produção, com base em dados de produção referentes ao período entre janeiro de 2009 e julho de 2010. Os dados de produção referentes às linhas escolhidas como base de análise para este trabalho (Base, linha B e Emulsões 1,2, 4 e 5) são mostrados na Tabela 3.1. Cabe mencionar que os dados da Tabela 3.1 refletem valores médios referentes ao conjunto de produtos processados em cada linha. Os tempos de batelada foram utilizados na análise e definição das linhas a serem estudadas com o objetivo de reduzir os tempos das mesmas com a otimização do sistema de agitação.

Tabela 3.1: Comparação dos diferentes valores de produção.

PRODUTO	BATELADA (t)	TEMPO (h)	Produção TFL (kg)	Custo (R\$/kg)	Custo X Volume	%
Linha B	3,5	2.15	858000	1,6	1372800	4%
Emulsão 1	12 ou 4	8.25	3195753	2,8	8948108	24%
Emulsão 2	12 ou 4	8.45	874609	2,25	1967870	5%
Base	10 ou 5	4.00	2591741	2,4	6220178	17%
Emulsão 4	5	4.05	577507	4,15	2396654	7%
Emulsão 5	5	4.10	221226	3,05	674739	2%
OUTROS (67)	-	-	10455049	X	14953888	41%
TOTAL	-	-	-	-	36534238	100%

3.2 SISTEMAS DE AGITAÇÃO TESTADOS

Todos os experimentos foram feitos no sistema que corresponde a Figura 3.1. A adição dos produtos foi realizada por meio de um Becker com o conteúdo adicionado na parte superior do sistema de agitação, na velocidade de agitação e temperatura especificadas para cada experimento.



Figura 3.1: Sistema de agitação.

Com a finalidade de se preservar as relações geométricas dos vasos de mistura existentes na produção, reproduziram-se as dimensões do sistema de bancada numa razão de redução geométrica constante para todos os componentes do sistema de agitação para as linhas com exceção ao da Linha B, conforme mostrado na Tabela 3.2. A relação de redução para a linha B não é igual as demais no tamanho do impelidor e sua distancia ao fundo do tanque, devido à exata reprodução do vaso existente na planta. As demais linhas são produzidas em tanques de relações de redução iguais, pois são idênticos no processo .

Tabela 3.2: Dimensões da planta e do vaso experimental.

Dimensão	Tanque linha B (m)	Tanque Emulsão, Linha Base e Sílica (m)	Bancada (m)
Altura de líquido	1,65	~1,8	~0,165
Diâmetro do tanque	1,65	1,8	0,165
Diâmetro dos impelidores	0,30	0,6	0,055
Largura do impelidor	0,05	0,12	0,011
Distância do impelidor ao fundo do tanque	0,2	0,6	0,055
Largura das Chicanas	0	0,18	0,016

Alguns experimentos foram realizados em duplicata para identificar se as medidas de tempo eram tendenciosas ou confiáveis.

O vaso de mistura usado foi um Becker de 3,5 litros com as paredes totalmente transparentes para facilitar a análise visual em todos os ângulos. Os demais componentes do sistema foram feitos com aço inox soldado, sendo que os agitadores eram fixados por meio de uma porca presa ao impelidor, com fácil remoção.

Os impelidores usados são mostrados na Figura 3.2. O impelidor de 2 Pás de 10° apresenta diâmetro de 0,3m e largura da pá de 0,004m. Todos os demais impelidores usados possuem o mesmo diâmetro e altura (0,055m e 0,011m, respectivamente). Todos os impelidores foram submetidos à rotação no sentido horário, direcionando o fluxo para o fundo do tanque ou para as paredes do mesmo.

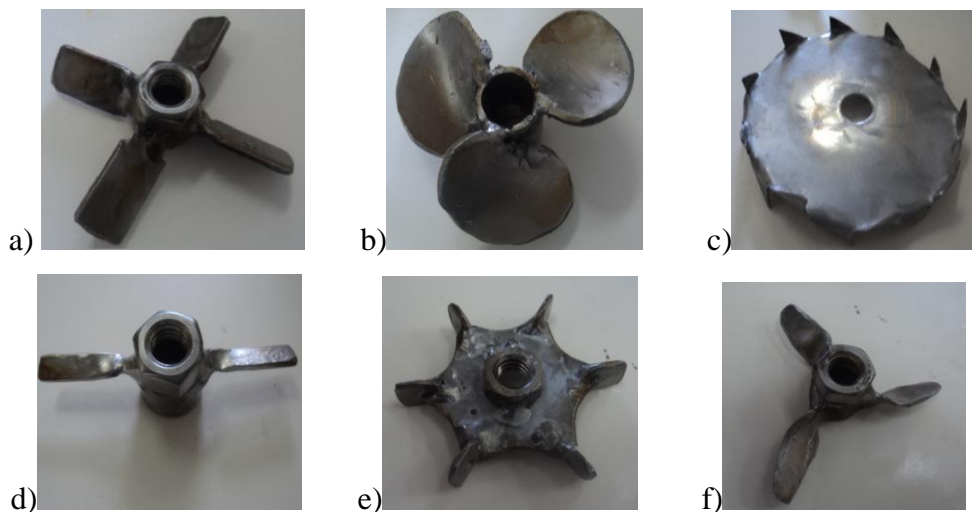


Figura 3.2. Impelidores avaliados: a) 4 pás de 45°; b) Hélice Naval; c) Disco Cawles; d) 2 pás de 10°; e) Turbina Rushton; f) Alta Eficiência.

As variáveis analisadas nos testes foram viscosidade, densidade e/ou aspectos visuais realizados rotineiramente pelo controle de qualidade interno da empresa. As medidas de viscosidade foram feitas em um viscosímetro de Brookfield (modelo DVII).

3.3. PROCEDIMENTO UTILIZADO NOS TESTES DE AGITAÇÃO REFERENTES A CADA LINHA DE PRODUTO

3.3.1. LINHA B

Os experimentos da linha B foram executados utilizando uma formulação representativa dos 4 produtos da linha que possuem maior comercialização, utilizando um produto contendo a média das quantidades de cada componente principal da linha.

Dessa forma, cada experimento conteve 3,5 kg de produto, com composição definida conforme formulação de cada família, adicionando-se em água, um álcali, tensoativo e um ácido viscoso nessa respectiva ordem, pesados previamente com uma precisão de 3%. A adição dos ingredientes foi feita na parte superior do vaso na ordem em que foram mencionados anteriormente, usando um Becker independente para cada ingrediente. Nos testes foram variados o tipo de impelidor, a presença de chicanas e a velocidade de rotação da agitação.

No caso desta linha, o tempo de homogeneização foi à única variável considerada na análise dos resultados, já que o produto final é homogêneo. O tempo de mistura foi avaliado visualmente no tanque de mistura, observando não homogeneidades visíveis pela coloração diferenciada dos componentes da mistura .

3.3.2. DISPERSÃO DE SÍLICA

Os testes para a produção da dispersão foram realizados em duas etapas. A primeira foi para analisar a capacidade de molhabilidade de cada fluxo gerado pelo impelidor. A segunda etapa foi verificar a completa dispersão de sílica no sistema.

Devido a fatores relacionados qualidade do ambiente de trabalho no laboratório de análises, estas duas etapas do processo de dispersão de sílica foram realizadas em dois experimentos independentes.

O procedimento da primeira etapa consistiu em adicionar sílica na parte superior do Becker, contendo água a uma temperatura ambiente de 25°C, e cronometrar o tempo para que não houvesse mais sílica sobrenadante. A verificação da existência de sílica na superfície foi feita visualmente. Analisou-se a variação do tempo para o desaparecimento completo das

partículas de sílica sobrenadantes no vazo, em função da velocidade de rotação e da presença de chicanas, para os cinco impelidores.

Para a análise da etapa de dispersão total, o teste foi iniciado com a sílica já imersa no líquido, porém sem estar ainda dispersa. Primeiramente foi feita uma base concentrada com 22% de sílica previamente molhada em água, a qual posteriormente era diluída a 14% de massa de sílica em água para a fase final do teste (o que corresponde a um total de 500 g de sílica em 3,5 kg de produto). É importante ressaltar que a massa de sílica total usada nos testes de molhagem (primeira etapa) foi muito inferior à massa utilizada nos testes de dispersão. Isto foi somente uma estratégia para diminuir os problemas de geração de pó durante os testes.

O tempo de mistura foi cronometrado a partir do início da rotação até a homogeneização completa. A percepção da homogeneização completa foi realizada visualmente através de análises periódicas consistindo no escorrimento da dispersão sobre uma placa plana de vidro, contra um feixe de luz. Estas análises de homogeneização foram realizadas com periodicidade de 20 segundos, desde o começo do teste até que não fosse mais observada a presença de partículas de sílica com tamanho suficiente para registro visual.

3.3.3. EMULSÕES

No intuito de se avaliar apenas as forças exercidas pelo impelidor no processo de emulsão o experimento foi feito com o sistema água e lecitina de soja. Essa escolha foi pela proximidade das propriedades físicas da lecitina com os demais óleos utilizados pela empresa e principalmente por seu caráter surfactante, diminuindo assim as forças de superfície.

As quantidades usadas de água e lecitina de soja foram testadas previamente para que a viscosidade final da emulsão experimental fosse aproximada a da planta industrial. A partir de testes preliminares, realizados com o objetivo de chegar a um tempo de homogeneização avaliável, observou-se que em temperatura ambiente o tempo de diminuição de gota alcançava valores superiores a 6000 segundos. Assim, definiu-se trabalhar a temperaturas próximas a 60°C, na qual se observou tempos de mistura menores que 3000s.

O procedimento experimental consistiu em um aquecimento de 2,8 kg de água na faixa de 58,5 °C até 61,5°C para facilitar o processo de emulsão e na adição de 0,6 kg de lecitina de soja na parte superior do Becker, cronometrando-se então o tempo até a

homogeneização. Nos testes foram variados o impelidor, a velocidade de agitação e a presença ou não de chicanas.

A homogeneização foi avaliada com base em testes visuais que consistiram em mergulhar uma espátula de metal plana no vaso, retirá-la do vaso e verificar a presença grumos de lecitina não dispersa na espátula. A identificação é facilitada pelo fato de que os grumos possuem uma cor mais escura que a do sistema que já foi totalmente emulsionado, o que torna a verificação visual um método confiável e utilizado pelo controle de qualidade da empresa.

3.3.4. LINHA BASE

Também neste caso, a formulação de teste foi estipulada a partir da composição média dos produtos dessa linha. Como testes preliminares indicaram que a etapa crítica do processo industrial (que consiste na adição seqüencial dos componentes) é a adição do espessante, optou-se por realizar os testes da linha base de acordo ao seguinte procedimento: i) mistura prévia dos demais componentes em uma etapa preliminar, criando-se uma base do produto; ii) adição do espessante diluído em água.

As adições dos componentes até a adição do espessante eram de homogeneização imediata. Assim, o início da etapa de cronometragem foi a partir da adição do espessante, que tem tempos para homogeneização maior que as etapas anteriores. Assim, em cada teste inseriam-se no Becker de mistura 3,3 kg da base e depois se adicionava vagarosamente o espessante diluído (para evitar a formação de grumos) sob rotação de 1000 rpm e alterava-se a velocidade de rotação de acordo o valor especificado para o experimento, iniciando-se neste instante a cronometragem.

A opção de iniciar o procedimento em 1000 rpm se deve à baixa viscosidade do sistema até a adição do espessante, a qual leva a uma grande turbulência superficial que incorpora ar ao sistema e prejudica a qualidade do produto. Assim, depois da adição do espessante, aumentava-se a rotação gerando um aumento de turbulência menos significativa na superfície do líquido

A análise de mistura completa do experimento foi realizada de duas formas. A primeira utiliza-se uma espátula, de maneira similar ao teste descrito para as emulsões. A segunda avaliação era feita retirando-se, com um Becker, 25 mL do material, diluindo-se com a mesma quantidade de água e analisando-se o escoamento do material diluído sobre uma

placa de vidro, posicionando-se a placa contra uma superfície que aumentava o contraste de pontos de espessante não diluídos. Com a completa homogeneização se verificava o tempo de mistura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. LINHA B

Conforme discutido na Seção 3.3.1, o procedimento consistiu na adição sequencial de álcali, tensoativo e ácido à massa de água colocada no Becker. Tanto na adição de álcali quanto de tensoativo, a homogeneização foi alcançada em tempos da ordem de poucos segundos, consideravelmente inferiores ao tempo requerido para homogeneização após à adição do ácido. Isto se deve ao fato de que o ácido por si só possui uma viscosidade superior a do álcali e do tensoativo, além deste ser adicionado a um sistema com viscosidade superior a da água. Essa última adição foi identificada como a parte crítica da produção, sendo que os tempos de mistura analisados nesta seção dizem respeito somente a esta etapa do processo.

Na Figura 4.1 podem-se observar alguns passos da evolução do aspecto da composição durante a etapa de adição e homogeneização do ácido. Imediatamente antes da adição do ácido (ou seja, após a homogeneização do tensoativo), a mistura apresenta um aspecto turvo esbranquiçado (Figura 4.1a). Como o ácido apresenta cor marrom, após sua adição se pode visualmente identificar a homogeneização progressiva, observado nas Figuras 4.1b-d, sendo que o instante em que a condição apresentada na Figura 4.1d é atingida foi utilizado como indicador do tempo de mistura do ácido.

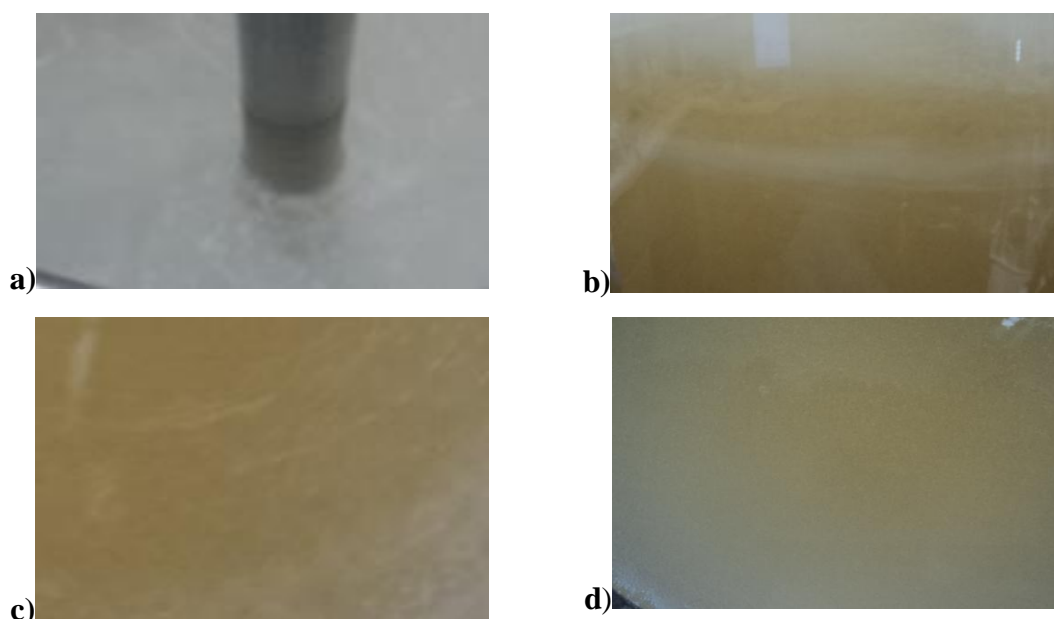


Figura 4.1 a-d. Etapas de homogeneização: a) antes da adição de ácido; b) imediatamente após a adição de ácido; c) estado intermediário; d) estado final.

A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros de processo e os valores medidos de tempo de mistura em cada um dos testes realizados. Os valores do número de Reynolds nas rotações utilizadas possuem valores próximos e limitados a escoamentos no regime de transição sendo inferiores a 200, afirmando-se que o regime de escoamento é semelhante nas duas rotações utilizadas. Em consideração a este fato, pode-se afirmar que as diferenças observadas nos tempos de mistura devem-se principalmente aos diferentes padrões de fluxo impostos pelas diferenças nas geometrias dos impelidores e pela presença ou não das chicanas. Como os números de Reynolds nos testes das demais seções estiveram na mesma ordem de magnitude dos valores aqui mencionados, este parâmetro não será discutido nas seções posteriores.

Tabela 4.1: Valores obtidos experimentalmente para linha B.

Impelidor	Rotação (rpm)	Número de Chicanas	Tempo(s) Homogeneização	Tempo(s) Duplicata	ρ (g/cm³)
Alto Rendimento	500	0	220	-	1,030
	1000	0	125	135	1,015
	1000	4	340	-	1,010
Pás, 4 de 45°	500	0	360	-	1,030
	1000	0	190	180	1,025
	1000	4	250	-	1,020
Rushton	500	0	>600	-	1,030
	1000	0	185	180	1,015
	1000	4	230	-	1,010
Disco Cawles	500	0	>600	-	0,990
	1000	0	260	265	0,980
	1000	4	370	-	1,000
Hélice	500	0	245	-	1,020
	1000	0	150	145	1,015
	1000	4	210	-	1,005
Pás, 2 de 10° (atual)	500	0	>600	-	1,030
	1000	0	220	210	1,025
	1000	4	360	-	1,020

A comparação dos tempos encontrados para os diferentes sistemas de agitação indica que para este sistema os impelidores de maior capacidade de bombeamento levaram a tempos menores de mistura, sendo que dentre eles o impelidor de alto rendimento foi o mais eficaz, seguido pelo impelidor tipo hélice.

Levando em consideração que a utilização do impelidor de alto rendimento o tempo de homogeneização diminui em aproximadamente 33%, com relação aos tempos obtidos com o sistema atual de duas pás de 10°, seria aconselhável a substituição do impelidor.

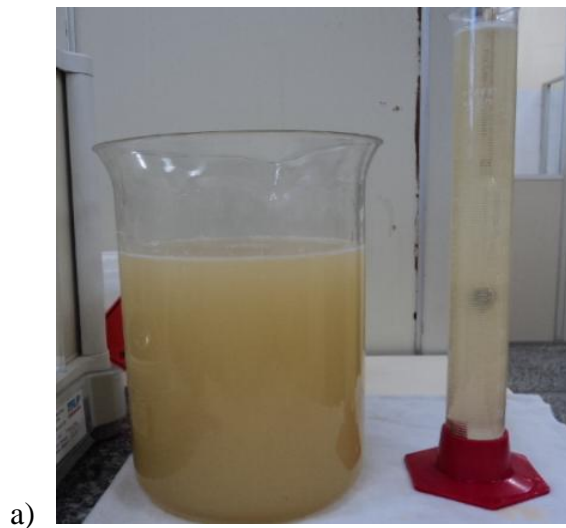
Para todos os impelidores a presença de chicanas aumentou o tempo de mistura a uma velocidade de rotação constante. Isto pode ser explicado pelo fato de as chicanas promoverem a criação de zonas de não mistura ao seu redor (conforme observação visual durante o experimento). Assim para desfazer essas áreas são necessárias altas rotações, principalmente para os impelidores de fluxo radial, pois estes não proporcionavam fluxo intenso próximo à superfície do tanque.

Durante o teste com os impelidores Rushton e Disco Cawles, baixas rotações faziam com que houvesse duas fases presentes no sistema, conforme a Figura 4.2. A fase superior não se misturava com a inferior caracterizando um regime de escoamento não controlado pela agitação, e apenas aumentando as rotações, o fluxo se dava totalmente no vaso.



Figura 4.2: Presença de fase superior.

Os valores de massa específica reportados na Tabela 4.1 podem ser usados para a quantificação indireta da presença de ar nas misturas finais. A presença de ar na mistura final deve-se ao fato que na mistura de líquidos viscosos o ar que é englobado no sistema, não apresentando uma ascensão rápida das bolhas pela resistência do líquido ao movimento ascendente do ar, diminuindo assim a densidade da mistura e dando um aspecto fosco esbranquiçado, conforme mostrado na comparação das Figuras 4.3a. A afirmação de que toda a turbidez observada na mistura deve-se às partículas de ar dispersas foi comprovada pelo fato da mistura apresentar um aspecto totalmente homogêneo e translúcido após 24 h de repouso (Figura 4.3b).



a)

Figura 4.3a: Presença de ar no produto.



b)

Figura 4.3b: Produto após 24h.

Este aspecto é importante porque se a massa específica estivesse menor que $0,95 \text{ g/cm}^3$, o envasamento do produto só seria possível após o desaparecimento dessas bolhas. Em nenhuma das condições de mistura testadas foi atingido este limite de densidade, sendo assim considerada sem interferência.

Outro problema encontrado tanto nos testes realizados quanto no processo industrial é a formação de espuma. Levando em conta as características dos componentes da formulação, efetuou-se um teste no qual o ácido foi adicionado antes do tensoativo. Este procedimento diminuiu significativamente o problema da formação de espuma sem afetar as demais características de mistura descritas acima. A aplicação desta proposta no processo industrial está sendo analisada, sendo que a decisão final dependerá de testes adicionais a serem realizados.

4.2. DISPERSÃO DE SÍLICA

A Tabela 4.2 apresenta os tempos requeridos para a molhagem da sílica (Teste 1) e para total dispersão das partículas e aglomerados de sílica (Teste 2).

Tabela 4.2: Valores obtidos experimentalmente para Dispersão de Sílica.

Impelidor	Rotação (rpm)	Número Chicanas	Tempo (s) Molhagem	Tempo (s) Dispersão	Duplicata Dispersão	Viscosidade (cP's)
Hélice	1250	0	12	1950	1900	0,740
	1250	4	160	1680	1700	0,730
	1750	0	10	1600	-	0,720
	1750	4	90	1350	-	0,750
Pás, 4 de 45°	1250	0	13	1440	-	0,690
	1250	4	165	1560	-	0,740
	1750	0	11	1260	-	0,720
	1750	4	115	1000	1040	0,740
Alta Eficiência	1250	0	12	1400	-	0,750
	1250	4	150	1260	-	0,760
	1750	0	9	1250	1300	0,730
	1750	4	105	940	-	0,710
Rushton	1250	0	11	1380	-	0,760
	1250	4	140	790	810	0,710
	1750	0	9	1220	-	0,700
	1750	4	75	730	740	0,720
Disco Cawles	1250	0	12	760	790	0,700
	1250	4	170	900	980	0,690
	1750	0	11	700	730	0,730
	1750	4	100	650	660	0,710

Os tempos de molhagem para os diferentes tipos de impelidores na ausência de chicanas não apresentaram diferenças significativas nas velocidades de rotação utilizadas. Acredita-se que seja necessária apenas uma rotação mínima para que existam vórtices para facilitar a migração da sílica da superfície do líquido para o seu interior.

Observa-se que a presença de chicanas faz com que os tempos de molhagem aumentem consideravelmente. Sendo assim, é aconselhável evitar o uso de chicanas no sistema de agitação, para evitar poeira reduzindo os tempos de molhagem do pó. Neste sentido, é importante ressaltar que a geração de poeira constitui um problema bastante crítico na planta, pois se necessitaria trabalhar com velocidades de agitação menores e, conseqüentemente, tempos maiores de mistura para evitar a poeira. Um exaustor não poderia ser usado com muita potência de exaustão, pois arrastaria muita sílica na corrente desperdiçando material. Assim o tempo de consumo da sílica sobrenadante tem grande influência no processo.

A Figura 4.4. mostra o produto em dois estágios do processo: antes (Figura 4.4a) e depois (Figura 4.4b) de atingir a homogeneização. Os tempos de dispersão apresentados na

Tabela 4.2 referem-se ao instante em que a condição de homogeneidade da Figura 4.4b foi atingida.

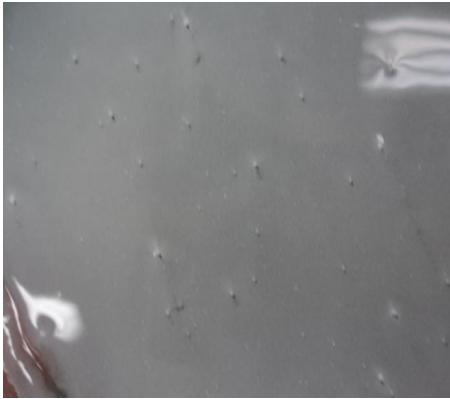


Figura 4.4a: Pontos não dispersos.



Figura 4.4b: Completa dispersão.

De acordo aos dados da Tabela 4.2 tem-se uma diminuição significativa no tempo de dispersão para impelidores com maior característica de cisalhamento. Por outro lado, a presença de chicanas em rotação constante diminui os tempos de processo por aumentar a turbulência do fluxo. Para todos os impelidores, um aumento da rotação também provocou uma diminuição nos tempos, sendo que os menores tempos se verificam no impelidor tipo Rushton e Disco Cawles, ambos com predomínio da característica de cisalhamento, sendo que apresentam desempenho melhor na maior rotação e na presença de chicanas.

De acordo ao discutido nos parágrafos anteriores, o uso de chicanas tem efeito negativo na molhagem e positivo na dispersão. Deve-se lembrar ainda que o tempo de molhagem mostrado na Tabela 4.2 corresponde à adição de apenas 10g de sílica, enquanto nos testes de dispersão no processo experimental aproximadamente 500 g de sílica são adicionados. Portanto, o tempo real de molhagem estimado deve ser multiplicado por 50 e alcança valores da mesma ordem de magnitude que o tempo de dispersão.

Levando em conta todos estes fatores, pode-se apontar o impelidor Disco Cawles a melhor opção entre os impelidores estudados, pois produz a melhor dispersão e não tem o tempo de dispersão tão afetado como os demais pela ausência de chicanas.

Como o processo industrial já utiliza este tipo de agitador, porém juntamente com o uso de chicanas, a sugestão que advém da discussão prévia é a remoção das chicanas dos tanques de dispersão de sílica.

4.3. EMULSÕES

A Figura 4.5 mostra a evolução característica da mistura durante o processo de agitação. Assim, o aspecto da emulsão era um líquido escuro que rapidamente se modificava para uma cor amarelada, mas com grande presença de grumos, conforme a Figura 4.5a. Esse aspecto inicial é obtido em tempos inferiores a 60 segundos e a partir daí, os grumos de lecitina de soja diminuíam de tamanho rapidamente até se chegar ao aspecto da Figura 4.5b. Para o avanço até o estágio da Figura 4.5c, onde se considera a obtenção de uma emulsão satisfatória, os tempos aumentaram consideravelmente, sendo que essa fase representa a maior parte do tempo de emulsão.

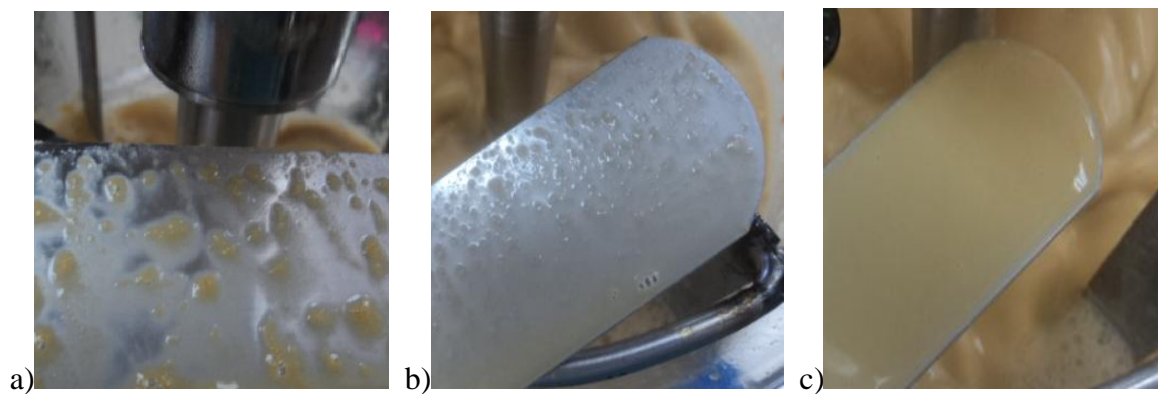


Figura 4.5. Estágios de emulsão: a) inicial; b) intermediário; c) final.

Os tempos de emulsão para os diferentes sistemas de agitação são apresentados na Tabela 4.3. Os tempos de mistura foram menores nos sistemas de agitação com maiores velocidades de rotação e presença de chicanas. Esse fato é ocasionado pela característica de fluxo proporcionado pela maior velocidade de escoamento que aumenta os gradientes e conseqüentemente o cisalhamento.

Essas maiores velocidades também não permitem a não formação de zonas mortas nas proximidades das chicanas, pois o líquido que escorre por ela possui força de arraste suficiente para movimentar os grumos localizados nas paredes do vaso e das chicanas. Assim as chicanas cumpriam seu objetivo de promover o turbilhão, sem a criação de zonas estagnadas, diminuindo os tempos de mistura. Em contraponto, para baixas rotações e a presença de chicanas criam-se zonas estagnadas nas proximidades das paredes com a chicana. Essas zonas aumentam o tempo de emulsão pela dificuldade do desprendimento dos grumos das paredes. Efeito esse desenvolvido acentuadamente em impelidores de fluxo radial.

Tabela 4.3: Valores obtidos experimentalmente para Emulsões.

Impelidor	Rotação (rpm)	Número de Chicanas		Tempo(s) de emulsionamento	Tempo(s) da duplicata
Hélice	1500	0		2760	2900
	1500	4		1860	-
	2000	0	➤	Transbordamento	-
	2000	4		1260	-
Pás, 4 de 45°	1500	0		2220	2100
	1500	4		1560	-
	2000	0	➤	Transbordamento	-
	2000	4		1200	1320
Alta Eficiência	1500	0	➤	Transbordamento	-
	1500	4		1320	-
	2000	0	➤	Transbordamento	-
	2000	4		800	860
Rushton	1500	0		1160	1002
	1500	4		1290	1940
	2000	0	➤	Transbordamento	-
	2000	4		654	752
Disco Cawles	1500	0		1038	1010
	1500	4		1350	1140
	2000	0	➤	Transbordamento	-
	2000	4		690	592

De acordo com os dados da Tabela 4.3 os dois impelidores com menor tempo de processo foram o Disco Cawles e a Turbina Rushton. Como os valores de tempos de mistura obtidos com estes dois impelidores foram muito próximos, não é possível chegar a uma conclusão definitiva sobre qual destes impelidores é o mais adequado, podendo-se dizer que sua ação é equivalente nas condições dos testes em escala de bancada.

O atual sistema de agitação industrial já opera com o impelidor tipo Cawles. Sendo assim fica clara a não necessidade de modificação da planta.

Para todos os impelidores, observou-se a formação de vórtices na ausência de chicanas, mesmo em testes adicionais feitos com velocidade de rotação de 1000 rpm. Na rotação de 2000 rpm, também para todos os impelidores testados, o vórtice formado foi tão intenso que provocou o aumento do nível do tanque em aproximadamente 50% e conseqüente transbordamento da mistura, impossibilitando o prosseguimento do experimento. No caso do impelidor de alta eficiência, este problema já foi verificado a 1500 rpm.

4.4. LINHA BASE

Para identificação da completa homogeneização foram avaliados dois métodos. O primeiro (Método A), onde não foi feita a diluição do produto (ver Seção 3.3.4), é similar ao método utilizado para as emulsões, apenas com ajuda de uma corrente de ar para diminuir a espessura da película. A Figura 4.6 mostra as etapas de homogeneização em três níveis de observação por este método.

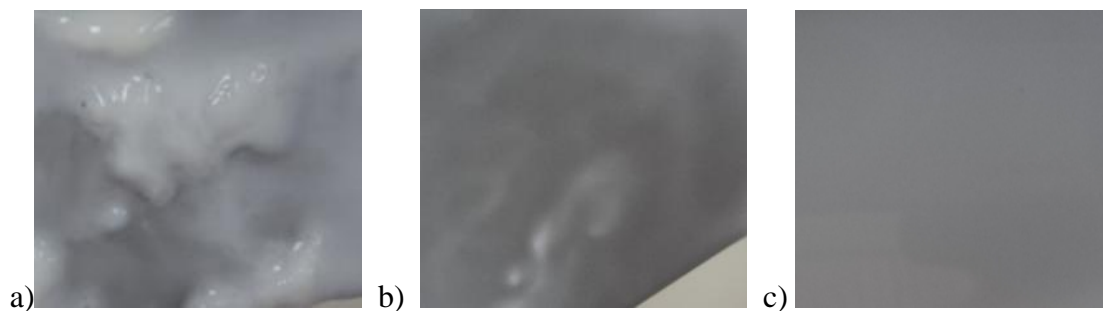


Figura 4.6. Estágios de mistura do método A: a) inicial; b) intermediário; c) final.

O Método B, que envolve a diluição (ver Seção 3.3.4), permitiu a identificação de grumos menores de espessante, conforme mostra a Figura 4.7, onde também se visualizam três estágios: a) logo após a adição, b) mistura intermediária e c) total homogeneização do espessante.



Figura 4.7. Estágios de mistura do método B: a) inicial; b) intermediário; c) final.

12

A Tabela 4.4 apresenta as condições de teste e os tempos de mistura obtidos pelos dois métodos descritos. Nota-se que os tempos de mistura pelo método A foram menores que o do método B. No método B, apesar da diluição, onde a água poderia dissolver o espessante, temos a capacidade de visualizar pontos menores, proporcionado pela película menos espessa sobre o vidro. Já no método A, os tempos são menores justamente pela maior espessura da

camada impossibilitando a distinção de pontos de tamanhos reduzidos. Apesar dessa diferença, os dois métodos possuem a mesma proporção entre os diferentes sistemas de agitação. Assim pode-se afirmar que os tempos obtidos pelos dois métodos servem como parâmetros para comparação de qualidade de mistura. No entanto, os tempos medidos pelo Método B são mais representativos em termos de tempo de processo requerido para obtenção de produto de boa qualidade.

Tabela 4.4. Valores obtidos experimentalmente para linha Base.

Impelidor	Rotação (rpm)	Numero de Chicanas	Tempo (s) Método A	Tempo (s) Método B	Tempo (s) Método A	Tempo (s) Método B
Disco Cawles	1500	0	660	840	-	-
	1500	4	840	1200	-	-
	2000	4	600	720	600	780
Rushton	1500	0	600	720	-	-
	1500	4	660	900	-	-
	2000	4	420	540	420	600
Alta eficiência	1500	0	900	1140	-	-
	1500	4	960	1320	-	-
	2000	4	720	1020	960	1080
Hélice Naval	1500	0	900	1080	-	-
	1500	4	1020	1200	-	-
	2000	4	660	780	780	1140
Pás, 4 de 45°	1500	0	840	960	-	-
	1500	4	900	1080	-	-
	2000	4	600	840	660	960

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.4 verifica-se uma diminuição nos tempos de mistura para sistemas com presença de chicanas e 2000 rpm em todos os impelidores. Para rotação menor, mesmo com chicanas os tempos aumentaram devido à inexistência de fluxo na parte superior do tanque, causando a presença de grumos de espessante sobrenadantes. Assim, aglomerados que se fixam nas bordas das chicanas apresentam grande dificuldade para se desprender aumentando os tempos de mistura consideravelmente.

Dentre os diferentes impelidores, os que apresentam melhores resultados foram a turbina Rushton e o Disco Cawles, que é atualmente usado na planta. Ambos possuem uma grande característica de cisalhamento, mas a turbina Rushton possui uma característica de

bombeamento maior do que a do Disco, desfazendo com maior facilidade os grumos sobrenadantes e reduzindo os tempos de mistura em relação ao disco Cawles.

Assim, levando-se em conta as análises acima mencionadas, acredita-se que a substituição do Disco Cawles pela turbina Rushton pode proporcionar uma diminuição nos tempos de mistura do processo industrial.

5. CONCLUSÕES

Por meio dos experimentos e seus respectivos resultados pode-se afirmar que a estratégia para avaliação dos impelidores realizada mostrou-se adequada. Apesar do caráter qualitativo da análise, o primeiro passo para a otimização, que consiste na seleção dos impelidores nos vasos de mistura da empresa em questão, foi satisfatória e apresenta resultados claros.

Para a linha B, composta de líquidos miscíveis com altas viscosidades, os impelidores com caráter de bombeamento tiveram melhor desempenho. Entre eles o de destaque foi o de alta eficiência, o qual proporcionou os menores tempos de homogeneização.

Para a linha de dispersão de sílica, apesar dos efeitos contrários apresentados pela presença de chicanas nas duas etapas do processo de mistura, molhagem e dispersão, foi possível obter uma solução de compromisso, representada pelo impelidor Cawles, que apresentou boa qualidade mistura e pequena influência das chicanas.

Na linha de emulsões os dois impelidores com maior característica de cisalhamento geraram os melhores resultados de mistura, sendo que os tempos de processo são reduzidos na presença de chicanas.

Já para a linha base, a característica de bombeamento do impelidor mostrou ser também um fator importante, apesar do cisalhamento ser ainda a contribuição fundamental devido à necessidade de redução de tamanho da fase dispersa. Assim, o impelidor Rushton, que possui ambas as características, demonstrou ser mais eficiente que os demais impelidores testados.

Nesse contexto, oportunidades de melhorias nos processos foram identificadas e propostas no estudo. Uma verificação dos sistemas mais eficiente deverá ser feita em escala industrial para uma comprovar se os resultados obtidos em escala bancada serão confirmados em escala industrial.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Levando em consideração que os experimentos proporcionaram somente informação comparativa entre as diferentes configurações testadas para os sistemas de mistura analisados, uma etapa fundamental na continuidade deste trabalho seria uma análise detalhada da influência das condições de operação sobre a eficiência de mistura para as configurações selecionadas para cada linha.

Assim, propõe-se que seja feito um estudo variando-se as rotações em valores próximos e consecutivos, com o objetivo de encontrar exatamente qual a rotação ótima para o processo. Os experimentos até então realizados se contiveram apenas para selecionar o impelidor, sendo que suas condições de operação merecem um estudo mais aprofundado.

Quanto à presença das chicanas, em alguns experimentos a análise visual dos padrões de escoamento verificados sugere que a dimensão desta era excessiva. Portanto, sugere-se avaliar mais detalhadamente o efeito dos parâmetros relacionados à configuração do conjunto de chicanas utilizado: dimensão, geometria e posicionamento das chicanas, bem como número de chicanas.

Seria necessário também desenvolver uma estratégia adequada de *scale-up* do sistema de agitação para possibilitar o uso mais direto em processo das informações geradas em escala bancada. Para isso deve-se realizar um estudo mais detalhado nos números adimensionais e também, para melhor compreensão dos escoamentos, utilizarem os recursos da fluidodinâmica computacional.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOUWMANS, I et al. *Blending liquids of differing viscosities and densities in stirred vessels*. Trans IChemE, Vol 75, Part A, 1997.

DIETSCHE, W. *Mix or match: Choose the best mixers every time*. Chemical Engineering, vol 105, n 8. Pg 70-75. 1998.

FASANO, J.B. et al. *Advanced impeller geometry boosts liquid agitation*. Chemical Engineering, p 110-116, 1994.

FOX, R.W., McDONALD, A.T. *Introdução à mecânica dos fluidos*. 4 ed. Rio de Janeiro. Ed. Guanabara Koogan S.A, 1992. 662 pg.

JUNIOR, C.F.J. et al. *Agitação e mistura na indústria*. 1 ed. Rio de Janeiro. Ed. LTC, 2007. 222p.

HARNBY, N. et al. *Mixing in the process industries*. 1 ed. London. Ed. Butterworths, 1985. 375pg.

HICKS, R.W. et al. *How to design agitators for desired process response*. Chemical Engineering, pg 102-119. 1976.

McCABE, W.L. et al. *Unit operations of chemical engineering*. 7 ed. New York. Ed McGraw-Hill, 2005. 1140pg.

PERRY, R.H. et al. *Perry's chemical engineers' handbook*. 6 ed. New York. Ed McGraw-Hill, 2336p. 1997.

ROMANO, R.C.O. et al. *Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa*. Cerâmica 54. pg 456-461. 2008.