

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**PROCESSO CAVITATION – INOVAÇÃO EM REFINO DE ÓLEO DE
SOJA**

ISADORA AREDES MAIONCHI

UBERLÂNDIA (MG)

2017

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**PROCESSO CAVITATION – INOVAÇÃO EM REFINO DE ÓLEO DE
SOJA**

ISADORA AREDES MAIONCHI

Tese apresentada ao Programa de Graduação em
Engenharia Química da Universidade Federal de
Uberlândia como parte dos requisitos necessários
à obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química

Orientador: Prof. Dr. Cícero Naves de Ávila
Neto

UBERLÂNDIA (MG)

2017

MEMBROS E ASSINATURAS DA BANCA EXAMINADORA

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Hugo Maionchi e Rejane Maionchi, e à minha irmã, Eduarda Maionchi, por me acompanharem nesta jornada da graduação, me proporcionando todo apoio e carinho em todos os momentos. Esta conquista é NOSSA!

Ao professor Doutor Cícero Naves de Ávila Neto, quem me orientou e me guiou neste último ano de graduação. Obrigada pela dedicação e acessibilidade para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à quem me abriu as portas para a indústria do óleo e me acolheu na área de refinaria e envase: Flávio Luís Lemos. Obrigada pelos ensinamentos.

Aos meus amigos, que compartilharam cada ano desta vitória comigo, os meus mais sinceros agradecimentos por serem minha família em Uberlândia.

À Deus, por permitir que estas pessoas de luz participassem da minha vida, me transformando em uma pessoa e profissional melhor.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	7
RESUMO	8
1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. PROCESSO DE NEUTRALIZAÇÃO	11
2.2. BOMBAS	19
2.3. CAVITAÇÃO	22
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
3.1. RENDIMENTO DO REFINO	25
3.2. ÁCIDO FOSFÓRICO	26
3.3. MAIS DE 30% DE REDUÇÃO NO USO DE SODA CÁUSTICA	26
3.4. SÍLICA	26
3.5. DESCRIÇÃO DO PROCESSO COM A NANONEUTRALIZAÇÃO	26
4. CONCLUSÃO	27
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da neutralização de óleo de soja	12
Figura 2 - Representação química dos fosfatídeos	13
Figura 3 - Centrífuga e seus detalhes.....	16
Figura 4 - Reação dos fosfolipídeos com ácido fosfórico	17
Figura 5 - Reação de neutralização dos ácidos graxos	17
Figura 6 - Neutralização ácido fosfórico e hidróxido de sódio	18
Figura 7 - Reação triglicerídeo e soda	18
Figura 8 - Funcionamento de turbobombas	19
Figura 9 - Funcionamento de bombas de engrenagem	20
Figura 10 - Seção transversal da célula	21
Figura 11 - Área da seção transversal da engrenagem	21
Figura 12 - Diagrama trifásico.....	22
Figura 13 - Fases da cavitação em 2D	23
Figura 14 - Fases da cavitação em 3D	23
Figura 15 - Situações de cavitação	24
Figura 16 - Cavitação de um rotor de bomba centrífuga	24
Figura 17 - Fluxograma da nanoneutralização de óleo de soja	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teor de fosfatídeos em diversos óleo vegetais	12
Tabela 2 - Teor de cada fosfatídeo no óleo de soja	13
Tabela 3 - Parâmetros cinéticos de reação dos fosfatídeos	14
Tabela 4 - Ácidos graxos em diversos óleo vegetais.....	15

RESUMO

Devido aos inúmeros benefícios do óleo de soja à saúde humana, seu consumo aumentou significativamente de 2007 a 2016. Na produção deste óleo, o refino é a etapa que transforma o óleo bruto ou degomado em desodorizado ou refinado, pronto para o consumo humano.

Em uma refinaria de óleo de soja, tem-se 3 principais processos: neutralização, branqueamento e desodorização. Estas etapas são responsáveis por eliminar certas substâncias que dão cor, odor e sabor desagradáveis para o óleo e são inevitavelmente extraídas da semente da soja.

A neutralização tem por objetivo eliminar os fosfolipídeos não hidratáveis e os ácidos graxos livres, denominados AGL, através da adição de ácido (comumente o fosfórico) e soda, respectivamente. Assim, as reações ocorridas produzem uma fase pesada de impurezas e uma fase leve que é o óleo neutro, as quais são centrifugadas e separadas.

Neste contexto, a etapa estudada no presente trabalho é a neutralização e a otimização da mesma através de uma nova tecnologia: Fluxo de Cavitação Controlada.

O sistema responsável por produzir a cavitação controlada é composto por uma bomba de engrenagens e um reator. Assim, com a produção de nanobolhas, a superfície de contato óleo-reagente aumenta drasticamente e a eficiência da reação também, fazendo com que o consumo de químicos e o custo reduzam.

Palavras-chave: óleo de soja, refinaria, neutralização, cavitação controlada

ABSTRACT

Due to the numerous benefits of soybean oil for human health, the consumption increased from 2007 to 2016. On the production of soybean oil, the refining is the stage that transforms the crude oil on refined oil, ready for human consumption.

On a soybean oil refinery, there are 3 processes: neutralization, bleaching and deodorization. These processes are responsible to eliminate certain substances that give unpleasant color, odor and taste for the oil and are inevitably extracted from the soybean seed.

The neutralization removes the non-hydratable phospholipids and the free fatty acids (FFA), through the addition of acid (commonly phosphoric) and soda, respectively. The reactions produce a heavy phase of impurities, that are separated by centrifugation.

In this context, the process studied in the present work is the neutralization and its optimization by a new technology: Controlled Flow Cavitation.

The system responsible for the production of controlled cavitation is composed of a gear pump and a reactor. With the production of nanobubbles, the oil-reagent surface contact increase drastically and the reaction's efficiency too, making the consumption of chemicals and the cost reduce.

Key words: soybean oil, refinery, neutralization, controlled cavitation

1. INTRODUÇÃO

Até o século XV, o plantio de soja limitou-se ao hemisfério ocidental, na região do rio Yantse, na China. Países europeus, como França e Alemanha, tentaram cultivar a soja, mas devido à fatores naturais e climáticos não obtiveram sucesso. [13]

Entre o fim do século XIX e início do século XX, os norte-americanos desenvolveram a semente para o cultivo comercial, melhorando-a geneticamente e expandindo assim seu cultivo e consumo para o Brasil e o mundo. [13]

Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor de soja no mundo, sendo o primeiro: os Estados Unidos da América. O plantio em território nacional aumentou 46% do ano de 2007 para 2014, passando de 20 milhões para 30 milhões de hectares plantados, segundo a ABRASEM (Associação Brasileira de Sementes e Mudanças). [2]

Juntamente com o aumento do plantio, o aumento do consumo de óleo de soja foi relevante. De 3.617.000 toneladas/ano (2007) para 6.580.000 toneladas/ano (2016), representando um aumento de 82% do consumo doméstico de óleo de soja no território brasileiro em menos de dez anos. [1]

Da semente de soja ao óleo refinado, inúmeros processos e reações ocorrem. Primeiramente, a soja é preparada, passando por moinhos quebradores, que dividem a semente em 4 partes. Assim, a soja partida é aquecida até 60° Celsius e laminada para obter uma lâmina de 0,2mm de espessura. Para melhorar a capacidade do solvente de extração, a massa laminada é expandida através de uma rosca extrusora com injeção de vapor. Para alimentar o extrator, esta massa é seca e resfriada. [4]

Esta massa passa pelo extrator, o qual consiste em uma tela filtrante e chuveiros de hexano na parte superior. Para melhor eficiência, o hexano segue em contra-corrente à massa. A miscela (fase líquida) é enviada para a unidade de evaporação onde o óleo bruto é separado do solvente. O farelo (fase sólida) é encaminhado para dessolventização, tostagem e secagem. O hexano evaporado do farelo é enviado para a unidade de condensação e reutilizado. [4]

O óleo bruto proveniente da extração pode ser degomado previamente ou não antes de ser encaminhado à refinaria. A degomagem consiste em: hidratar o óleo bruto com água quente e separar a goma (fase pesada) e o óleo degomado (fase leve) por centrifugação. Goma é o nome designado à lecitina, agente emulsificante que prejudica a qualidade do óleo e dificulta o processo de refino. [4]

Na refinaria, 3 processos elementares ocorrem: a neutralização, o branqueamento e a desodorização. [4]

No branqueamento, os pigmentos que dão cor indesejada ao óleo, como a clorofila, a xantofila e o caroteno, são eliminados. Para reagir com estas moléculas, terras clarificantes (ácido ativadas) são adicionadas ao óleo, fazendo com que elas entrem em seus sítios ativos e sejam eliminadas por filtração. A reação ocorre em um aquecedor, o qual é um tanque de transbordo que alimenta o clarificador, onde tem-se vapor direto para agitação. [4]

A desodorização é aplicada para remoção de elementos voláteis, como hidrocarbonetos e aldeídos e peróxidos que dão odor indesejável ao óleo. Este processo consiste basicamente em aquecer o óleo e enviá-lo para uma coluna de destilação. [4]

A neutralização é a primeira etapa que ocorre na refinaria e é determinante para o sucesso e rendimento das etapas posteriores (branqueamento e desodorização).

O processo que será estudado no presente trabalho é a neutralização e a otimização da mesma para uma maior eficiência em suas reações e uma redução no custo do processo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROCESSO DE NEUTRALIZAÇÃO

O óleo, vindo da extração, é bombeado para a refinaria e recebe o ácido fosfórico, concentração de 85%, em linha. Afim de homogeneizar o ácido com o óleo, a mistura passa por um misturador dinâmico antes de ir para o reator.

Após o ácido, adiciona-se soda cáustica, a qual passa pelo mesmo processo de mistura e retenção em reator.

Após a finalização das reações, o óleo reagido é centrifugado, separando as impurezas na fase pesada e o óleo neutro na fase leve. Em seguida, o óleo passa por um secador à vácuo para retirada da umidade, tornando-se óleo neutro seco.

Segue fluxograma do processo de neutralização na Figura 1. Este fluxograma mostra a neutralização clássica, sem a utilização da tecnologia de nanocavitação.

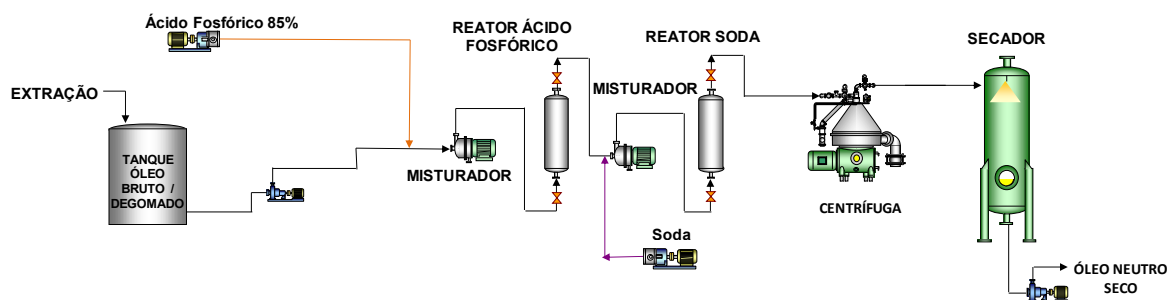


Figura 1 - Fluxograma da neutralização de óleo de soja

As adições de ácido e soda são empregadas afim de atingir um padrão de qualidade do óleo para consumo humano.

Um dos principais índices que determinam a qualidade de um óleo é o índice de fósforo. Este índice representa a quantidade de fosfatídeos no mesmo. Os fosfatídeos são classificados em: hidratáveis ou não hidratáveis. Os hidratáveis possuem alta afinidade com a água e solubilizam-se, sendo separados por polaridade do óleo. Já os não hidratáveis devem reagir com ácido para possuírem afinidade com a água. [4]

Cada óleo possui uma determinada concentração de fosfatídeos como indicado na Tabela 1. [4]

Tipo de óleo	Fosfatídeos (ppm P)
Óleo de soja	700 – 1000
Óleo de canola	450 - 500
Óleo de milho	250 - 300
Óleo de girassol	300 – 1000
Óleo de arroz	450 - 700
Óleo de palma	20 - 30

Tabela 1 - Teor de fosfatídeos em diversos óleo vegetais

O óleo de soja bruto é o que possui maior teor de fósforo, entre 700 e 1000 ppm de fosfatídeos em sua composição, sendo a maior parte pertencente ao grupo fosfatidil colina, fosfatidil etanolamina e fosfatidil inositol como mostrado na Tabela 2. [4]

Fosfolípídeo		Porcentagem
Fosfaditil colina	(PC)	22%
Fosfaditil etanolamina	(PE)	23%
Fosfaditil serina	(PS)	2%
Fosfaditil inositol	(PI)	20%
Ácido fosfatídeo	(PA)	5%
Fitoglicolípídeos	(PGL)	13%
Outros fosfolípídeos		15%

Tabela 2 - Teor de cada fosfatídeo no óleo de soja

A estrutura molecular dos fosfatídeos determina a sua capacidade de hidratação e separação do óleo. Na Figura 2, verifica-se a estrutura dos 3 principais fosfolípídeos e do ácido fosfatídico.

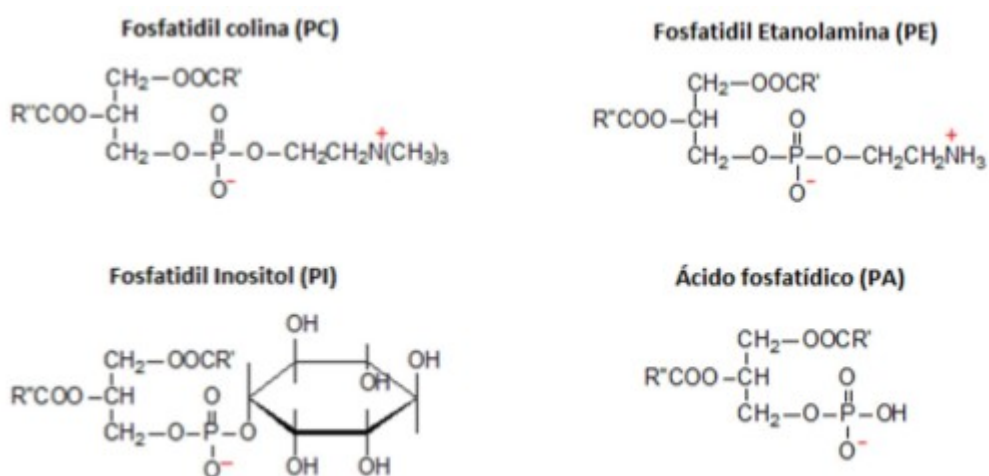


Figura 2 - Representação química dos fosfatídeos

O fosfatidil colina (PC) é altamente hidrofílico, devido à presença do grupo trimetilamina. Quando submetido à pH inferior à 4, sua hidratabilidade fica comprometida, pois o grupo trimetilamina e o fosfato se ligam, formando um sal interno. Em pH superior à 4 (faixa aplicada no momento da degomagem e do refino), o PC está na forma de íon dipolar e é impedido estereoquimicamente (estruturalmente) de fazer ligação entre os íons internos. [11]

O fosfatidil inositol possui 5 grupos hidróxidos, o qual aporta caráter extremamente polar à molécula e fazendo com que ele possua maior afinidade com água do que com o óleo. [11]

Para pHs inferiores a 4, o fosfatidil etanolamina (PE) apresenta-se na forma neutra, consequentemente hidratável. Porém no processo de refino, a neutralização é realizada com pH superior à 4 e o PE forma um sal interno entre a amina e o grupo fosfato, tornando-o de difícil hidratação. [11]

O ácido fosfatídico (PA) tem seu primeiro hidrogênio dissociado em um pH entre 2,7 e 3,8 e o segundo entre 7,9 e 8,6. Com a dissociação dos hidrogênios e a ligação de um metal alcalino (normalmente cálcio ou magnésio) ou metais de transição (Fe), o ácido fosfatídico torna-se ligeiramente hidratável e de mais difícil separação, sendo necessário o tratamento com ácido. [11]

Assim, entre os 4 principais fosfolipídeos, classificaremos o PC e o PI como hidratáveis e o PE e o PA em não hidratáveis. Ou seja, os hidratáveis podem ser retirados somente com a adição de água, sem nenhum tratamento com ácido, e os não hidratáveis precisarão ser tratados com ácidos afim de quebrar suas ligações intermoleculares e torná-los hidratáveis. [11]

Além da estrutura molecular, a remoção dos fosfatídeos é influenciada também por fatores cinéticos evidenciados experimentalmente e que constam na literatura.

Fosfolipídeo	PC	PI	PE	PA
Velocidade de hidratação (%)	100	44	16	8,5

Tabela 3 - Parâmetros cinéticos de reação dos fosfatídeos

Verifica-se na Tabela 3 que o fosfatidilcolina é a que possui maior velocidade e o ácido fosfatídico a menor.

A partir das estruturas moleculares e dos parâmetros cinéticos, verifica-se que o PC é o de mais fácil remoção e a PA de mais difícil remoção.

Além do índice de fósforo, a acidez do óleo está diretamente ligada à sua qualidade. O óleo na semente representa uma reserva energética, a qual será utilizada para sua germinação e até o momento em que a mesma tenha raiz e folha para poder manter-se viva. Como a planta

não consegue processar o óleo na sua própria forma, ela necessita de enzimas para quebrá-lo em açúcares. Estas enzimas (maioria lipases) estão localizadas também na semente da soja, mas estão completamente separadas. Caso esta semente sofra algum atrito físico, quebra, esmagamento ou a sua umidade for elevada demais, estas enzimas entram em contato com o óleo e reagem. Esta reação está diretamente ligada ao alto nível de acidez do óleo. Quanto melhor o armazenamento, menor a acidez do óleo. [12]

A acidez varia de acordo com o tipo de óleo também. Na Tabela 4, verifica-se a quantidade de cada ácido graxo que cada tipo de óleo possui. [4]

ÁCIDOS GRAXOS	Palmítico	Esteárico	Araquidônico	Linocérico	Oleico	Linoleico	Linolênico
Óleo de girassol	3,50	2,90	0,60	0,40	34,00	58,60	0,00
Óleo de milho	7,40	3,50	0,60	0,20	46,00	42,30	0,00
Óleo de soja	6,50	4,20	0,70	0,00	28,00	52,60	8,00

Tabela 4 - Ácidos graxos em diversos óleo vegetais

Nos óleos vegetais de girassol, milho e soja, a maior parte da acidez no óleo deve-se aos ácidos oleico e linoleico. [4]

Adiciona-se hidróxido de sódio em uma concentração entre 12 e 20 Bé (em excesso), o que permite neutralizar o excesso de ácido fosfórico adicionado anteriormente, pois a adição nunca é estequiométrica, e a acidez natural do óleo. A reação de neutralização com o ácido oleico e linoleico formará sais de sódio de ácidos graxos, denominados de sabões. [11]

O excesso de soda adicionado ao processo varia entre 15 a 30% para óleos de baixa acidez (< 1%) e de 30 a 50% para óleos de elevada acidez (>1). Se a porcentagem de excesso de soda for inferior ao adequado, o óleo final não ficará neutro (ele ficará ácido) e existe uma maior probabilidade de formação de emulsões entre a água e o óleo.

Emulsão é uma mistura líquida e heterogênea de 2 ou mais fases não miscíveis entre si, mas mantidas em suspensão uma na outra. O excesso de soda forma o eletrólito de sódio

(Na⁺), o qual é responsável por neutralizar as cargas desta emulsão e evitando que a mesma ocorra.

Se a porcentagem de excesso for muito elevada, há um aumento dos sabões no óleo neutro e, em casos extremos, pode ocorrer a formação de uma 3ª fase (solução concentrada de eletrólitos). [11]

A mistura do ácido fosfórico e da soda com o óleo é feita em misturadores dinâmicos intensivos de curto tempo de contato. Para o óleo de soja, que possui alta acidez, um tempo de contato maior é necessário e um tanque é utilizado após o misturador. [4]

Após a adição de ácido e soda, o óleo é centrifugado (Figura 3) para separar os fosfatídeos e os sabões reagidos do óleo. O óleo é a fase leve (oleosa), as impurezas são a fase pesada (aquosa).

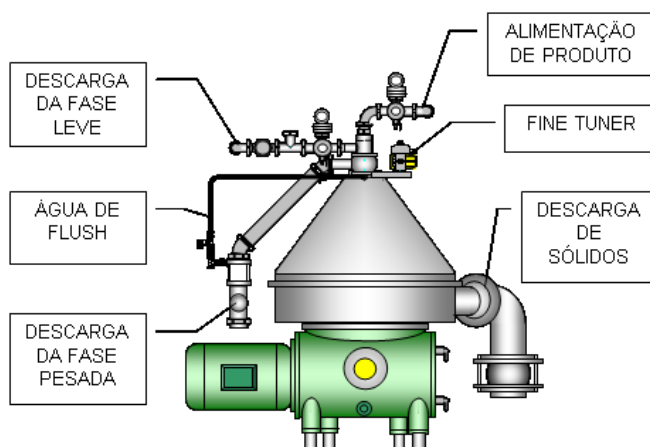


Figura 3 - Centrífuga e seus detalhes

Após a centrifugação, o óleo passa por um secador afim de retirar a água injetada durante toda neutralização, água utilizada para diluição da soda e do ácido fosfórico, e a água produzida nas próprias reações de neutralização. Caso o óleo não seja seco, a umidade causará sua oxidação e também prejudicará a próxima etapa (branqueamento).

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, um óleo de soja refinado deve possuir uma acidez de no máximo 0,06%, sabões até 1 ppm e fósforo até 3 ppm. A neutralização é a etapa responsável por manter o óleo dentro destes padrões de qualidade. [8]

A dosagem dos químicos (soda e ácido) deve ser otimizada, pois o aumento do uso de ácido gera uma acidez remanescente alta, o que exige uma dosagem de soda maior. Já uma

dosagem inferior a necessária gera um óleo com alto teor de fósforo e fora dos parâmetros de qualidade. O controle dos parâmetros deve gerar um equilíbrio entre o custo e a qualidade, otimizando assim o processo de refino.

2.1.1. MECANISMO REACIONAL NA ADIÇÃO DE ÁCIDO

O ácido fosfórico é adicionado afim de tornar os fosfatídeos hidrofóbicos (fosfatidiletanolamina e ácido fosfatídico associado a um metal) em moléculas solúveis em água.

Ao adicionar ácido fosfórico ao ácido fosfatídico ligado a um metal alcalino, o ácido ataca as ligações entre o oxigênio e o metal, fazendo com que a molécula do PA fique em sua forma iônica, consequentemente solúvel em água. O metal, magnésio, cálcio ou ferro, faz ligações iônicas com o ácido fosfórico (Figura 4). [11]

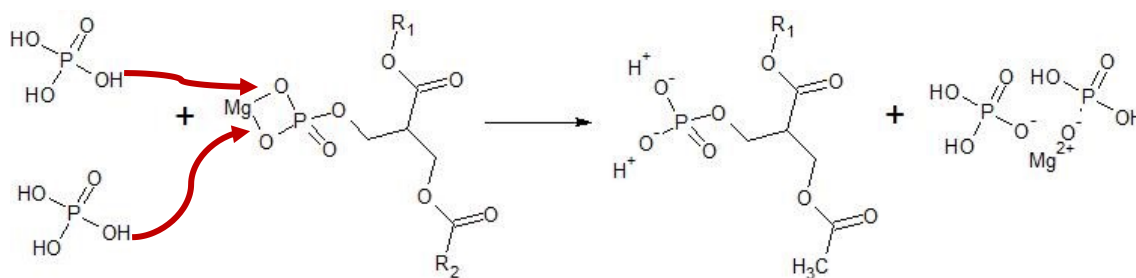


Figura 4 - Reação dos fosfolipídeos com ácido fosfórico

2.1.2. MECANISMO REACIONAL NA ADIÇÃO DE SODA

A soda é adicionada afim de neutralizar os ácidos graxos livres, principalmente o oleico e o linoleico no caso do óleo de soja.

A reação de neutralização formará um sal de sódio, extremamente solúvel em água, e uma molécula de água (Figura 5). [11]

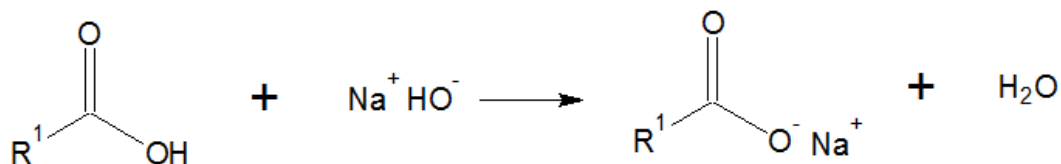


Figura 5 - Reação de neutralização dos ácidos graxos

A soda é dosada para neutralizar os ácidos graxos livres, como descrito na reação acima, mas também para neutralizar a acidez remanescente do ácido fosfórico (Figura 6).

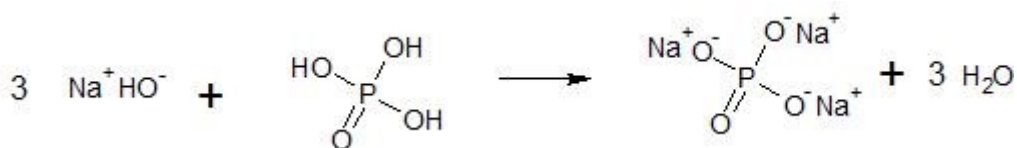


Figura 6 - Neutralização ácido fosfórico e hidróxido de sódio

Além das quantidades estequiométricas, um excesso de soda é utilizado para favorecer a separação dos sabões e evitar a formação de emulsões. Para um óleo de baixa acidez (até 1%), o excesso pode variar entre 15 e 30%. Para um óleo de alta acidez, o excesso varia de 15 a 30%. [11]

A formação de emulsões favorece uma reação paralela e indesejada que é a saponificação dos triglicerídeos, ou seja, transformação do próprio óleo de soja em sabão, como explicitado na Figura 7. [11]

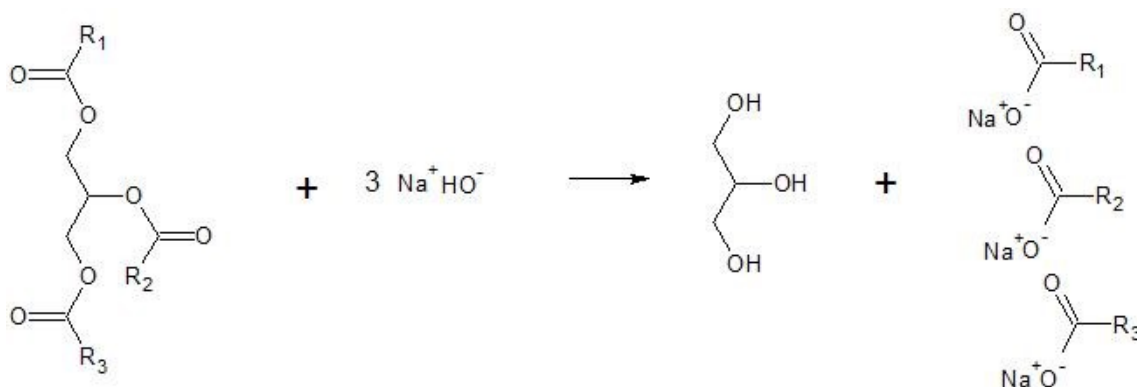


Figura 7 - Reação triglicerídeo e soda

2.1.3. PERDAS NA NEUTRALIZAÇÃO

No processo de neutralização, existem duas perdas: perdas por arraste de óleo para a borra no processo de centrifugação e perdas por saponificação do óleo por excesso de hidróxido de sódio. Há 2 maneiras de calcular estas perdas. A primeira consiste em avaliar a quantidade de óleo neutro produzido sobre a quantidade de óleo bruto alimentado na neutralização. Desta forma, obtemos a eficiência do processo.

$$\eta = \frac{\text{massa óleo neutro}}{\text{massa óleo bruto}}$$

A segunda maneira é calcular as perdas no processo: calcular a perda percentual de óleo resultante da neutralização sobre o conteúdo de ácidos graxos livres.

$$\text{Fator de perda} = \frac{\text{Perda da neutralização (\%)}}{\text{Ácidos graxos livres no óleo bruto (\%)}}$$

Em geral, esse fator fica abaixo de dois por cento, mas depende de fatores característicos do óleo bruto, acidez e fósforo principalmente.

2.2. BOMBAS

O deslocamento de líquidos de um lugar para outro é de grande importância em uma refinaria de óleo. No meio industrial, o bombeamento de líquidos se faz presente, proporcionando aumento de pressão e escoamento em atendimento a cada processo.

Com esta finalidade, utiliza-se máquinas de interação dinâmica, denominadas bombas. Estas transferem energia aos líquidos através da rotação de seus rotores ou impelidores. [9]

As bombas são classificadas em hidrodinâmicas (ou turbobombas) e hidrostáticas (ou de deslocamento positivo).

As turbobombas realizam o transporte de fluidos através da movimentação do rotor que recebe o fluido pelo centro e o expulsa pela periferia, pela ação da força centrífuga. Por isto, tais bombas são conhecidas como bombas centrífugas (Figura 8).

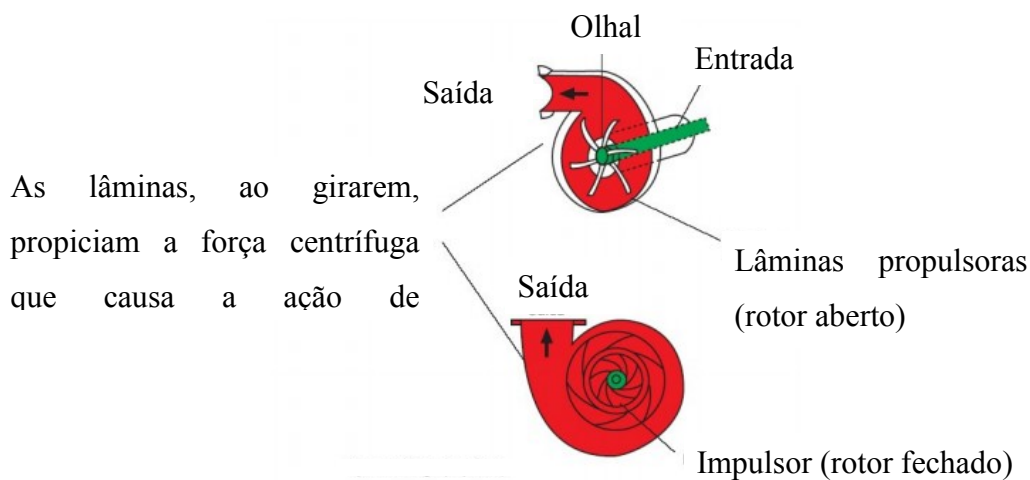


Figura 8 - Funcionamento de turbobombas

Já as bombas de deslocamento positivo possuem uma ou mais câmaras, onde localiza-se o órgão propulsor, que transfere energia de pressão ao líquido, provocando o escoamento. A cada rotação ou ciclo, uma determinada quantidade de fluido é fornecida.

As bombas de deslocamento positivo são denominadas como bombas volumétricas, devido ao fato de que o fluido ocupa e desocupa espaços com volumes conhecidos sucessivamente. As bombas volumétricas dividem-se em:

Êmbolo ou alternativas: pistão, diafragma, membrana

Rotativas: engrenagens, lóbulos, palhetas, helicoidais, fusos, parafusos e peristálticas

Bombas de engrenagem são bombas rotativas com duas engrenagens, onde uma é a motora e a outra é a movida. A motora é ligada a um eixo, o qual está conectado a um motor. A movida movimenta-se segundo às ordens da motora.

Conforme as engrenagens giram, uma zona de baixa pressão é gerada na sucção da bomba, o fluido entra e passa a ficar alojado entre a carcaça e as engrenagens, depois o líquido é ejetado à uma pressão maior. O funcionamento deste tipo de bomba pode ser verificado na Figura 9.

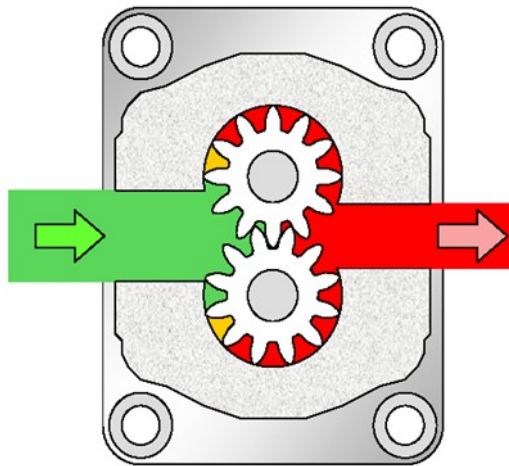


Figura 9 - Funcionamento de bombas de engrenagem

Segundo VON LINSIGEN (2001), a taxa de transporte de volume de fluido através das engrenagens é dada por:

$$D_{tc} = \frac{2 * A * b * z}{\pi}$$

Sendo:

Dtc: deslocamento volumétrico teórico da bomba (m^3/rad)

A: área da seção transversal de cada célula de transporte de fluido (m^2)

b: largura da engrenagem (m)

z: número de dentes [14]

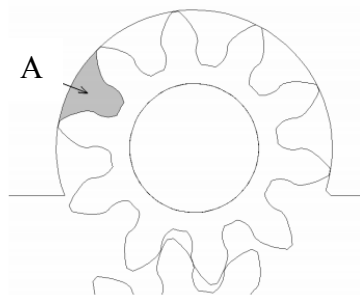


Figura 10 - Seção transversal da célula

Como a área transversal de cada célula resulta em um cálculo complexo, ERNEST (1960) propôs a consideração de que: a área entre os dentes é igual a área de um dente da mesma engrenagem, ou seja, subtraindo a área da circunferência maior da menor (vide figura 11), obtém-se o volume transferido. [5]

$$Dtc = \frac{\frac{\pi * dex^2}{4} - \frac{\pi * din^2}{4}}{2 * \pi} * b$$

Sendo:

dex: diâmetro externo da engrenagem (m)

din: diâmetro interno da engrenagem (m)

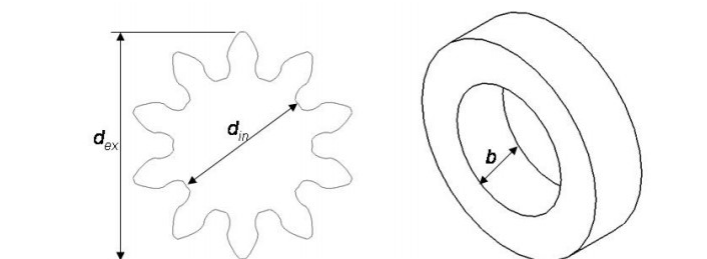


Figura 11 - Área da seção transversal da engrenagem

2.3. CAVITAÇÃO

A cavitação é a formação de bolhas e a implosão delas em um líquido. Isto ocorre quando o líquido é submetido à uma rápida redução de pressão. Este fenômeno é frequentemente relacionado ao mau funcionamento das bombas.

Como representado na Figura 12, a cavitação e a ebulição ocorrem quando o líquido se transforma em gás/vapor. A ebulição ocorre devido à variação de temperatura em regime isobárico, ou seja, o volume do líquido expande para manter o equilíbrio termodinâmico. Já a cavitação ocorre devido à variação de pressão em regime isotérmico, ocorrendo também a expansão em volume para atingir o equilíbrio.

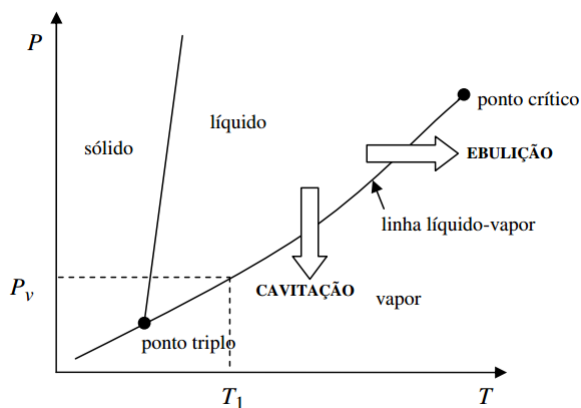


Figura 12 - Diagrama trifásico

Como o recalque da bomba tem por objetivo gerar uma pressão maior, na sucção temos uma zona de baixa pressão, onde pode ocorrer a formação das bolhas.

A equação de Bernoulli expressa as energias a serem conservadas durante o escoamento de um fluido. As energias a serem consideradas são: cinética, potencial e de fluxo.

Como pode-se verificar na equação, na sucção da bomba temos um aumento da velocidade do fluido, mas para manter o equilíbrio, a pressão é reduzida, a qual pode atingir valores iguais aos da pressão de vapor do fluido na temperatura de operação, causando sua evaporação e podendo causar o fenômeno denominado cavitação.

$$P_1 \downarrow + \frac{1}{2} \rho v_1^2 \uparrow + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Quando a pressão do fluido se torna maior, ou seja, quando o fluido se direciona para o recalque da bomba, a pressão externa exercida pelo líquido torna-se maior do que a pressão interna das bolhas. As dimensões da mesma reduzem bruscamente, causando seu colapso e deslocando o líquido circundante para seu interior.

2.3.1. FASES DA CAVITAÇÃO

As fases do processo de cavitação, representadas nas Figuras 13 e 14, são:

FASE 1 – Formação da bolha: a pressão na sucção da bomba encontra-se abaixo da pressão de vapor do fluido na temperatura de operação e bolhas começam a se formar.

FASE 2 – Início do colapso: a pressão no recalque é maior e a bolha começa a entrar em colapso. Este processo de colapso é totalmente assimétrico, fazendo com que a cavitação seja fonte de poderosas forças.

FASE 3 – Criação de um micro-jato: a bolha gera um micro jato para poder finalizar o processo de colapso.

FASE 4 – Colapso da bolha: o colapso final cria uma onda de choque local, transmitindo níveis muito altos de energia para o líquido. Os efeitos de bilhões dessas bolhas se formando e colapsando ao longo do tempo com o calor, pressão e ondas de choque criam o efeito da cavitação.

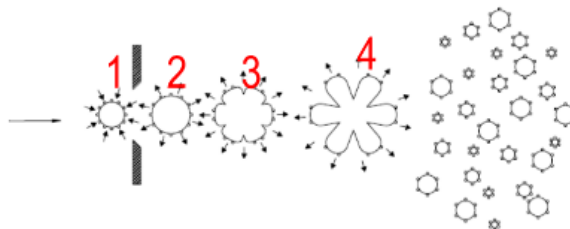


Figura 13 - Fases da cavitação em 2D

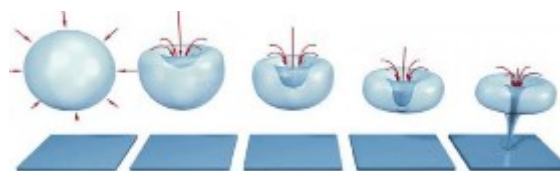


Figura 14 - Fases da cavitação em 3D

2.3.2. NÍVEIS DE CAVITAÇÃO

A cavitação pode ocorrer em 3 diferentes situações: sobre a superfície metálica, próximo à mesma e no fluido, como podemos verificar na Figura 15.

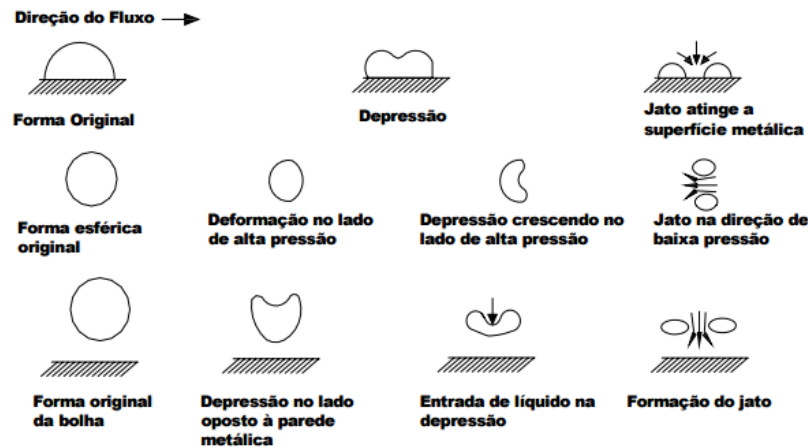


Figura 15 – Situações de cavitação

O que diferencia as três situações é o direcionamento do jato. A primeira situação atinge diretamente a superfície metálica. A segunda direciona-se para a zona de baixa pressão. A terceira pode ou não atingir a superfície metálica, dependendo da distância da mesma.

As superfícies atingidas pelos jatos, oriundos da energia liberada destas partículas, desagregam elementos do material, formando pequenas depressões. Este fenômeno causa um aspecto esponjoso e corroído da superfície (erosão por cavitação). Quando o desgaste atinge dimensões maiores, pedaços do material podem soltar-se e causar um furo na superfície como podemos verificar na Figura 16.

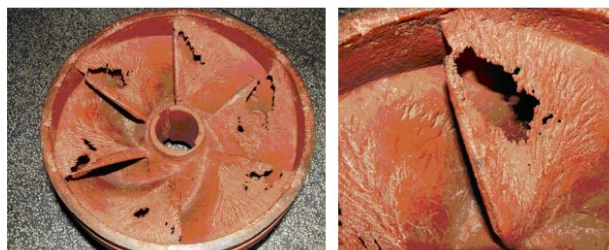


Figura 16 - Cavitação de um rotor de bomba centrífuga

Segundo Grein & Wyss (1974) e Knapp et al. (1970), o ciclo de cavitação pode atingir uma ordem de 25000 bolhas por segundo e a pressão realizada sobre às superfícies metálicas podem chegar à 1000 atm de pressão. Outro aspecto importante, o caráter cíclico da cavitação

gera ações mecânicas repetidas na mesma região metálica, ocasionando um aumento local de temperatura de até 800°C.

Os níveis de cavitação podem ser divididos em quatro níveis, variando de escoamento com ausência do fenômeno à um nível de mais alta intensidade. Ball et al. (1975) determinou os seguintes níveis. [3]

Nível 1 – Cavitação incipiente: início da cavitação, vibrações leves e não produz maiores efeitos sobre o sistema hidromecânico

Nível 2 – Cavitação crítica: regime constante com produção de ruído constante. Efeitos observados somente após longos períodos de exposição. Vibrações razoáveis com nível de ruído aceitável.

Nível 3 - Cavitação com perigo incipiente: ruídos relativamente altos com nível de vibrações tolerável, produzindo pequenos danos físicos.

Nível 4 – Cavitação plenamente estabelecida: nível excessivo de ruído e vibrações, com danos à estrutura evidentes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A cavitação, comumente vista como negativa, é uma poderosa ferramenta de mistura, que pode beneficiar inúmeros processos na indústria quando controlada.

Na indústria de óleo de soja, a cavitação é aplicada no processo de neutralização para melhorar a eficiência da reação, aumentando a área de contato óleo-reagentes.

A tecnologia traz os seguintes benefícios para o processo de refino de óleo de soja:

3.1. RENDIMENTO DO REFINO

Ocorre o aumento do rendimento do refino em mais de 0,2%. Graças à melhora do condicionamento do óleo em nanopartículas, a separação da fase aquosa e oleosa na centrífuga torna-se mais eficiente, reduzindo o arraste de óleo para a borra e diminuindo a perda de óleo para a fase aquosa.

Além da redução do consumo de sílica, ocorre também menos perda de óleo na sílica, pois o processo de adsorção é físico e é inevitável que o óleo seja também adsorvido.

3.2. ÁCIDO FOSFÓRICO

A nanoneutralização facilita a separação dos fosfolipídeos não-hidratáveis, pois a agitação e a cavitação faz com que migrem para a fase aquosa. O uso do ácido é substancialmente diminuído ou totalmente eliminado.

3.3. MAIS DE 30% DE REDUÇÃO NO USO DE SODA CÁUSTICA

Com a redução significativa do consumo de ácido fosfórico, a redução de soda é consequência. Além disto, a mistura no processo de nanocavitação faz com que a superfície de contato entre a soda e o óleo aumente, reduzindo também o consumo de soda e resultando em uma necessidade estequiométrica perfeita para converter todos os ácidos graxos livres em sabões sem a necessidade do excesso.

3.4. SÍLICA

A sílica, material adsorvedor, é utilizada para remoção de sabões que não foram removidos na neutralização. Com a melhora da centrifugação, menor será a concentração de sabões e menor o consumo de sílica.

3.5. DESCRIÇÃO DO PROCESSO COM A NANONEUTRALIZAÇÃO

Para a implementação da nanoneutralização, certas modificações devem ser feitas comparadas ao processo de neutralização usual.

Após a dosagem de soda, uma bomba de engrenagens de alta pressão deve ser instalada, seguida por um nanoreator. Este sistema de alta pressão será responsável pela produção de nanobolhas, as quais são benéficas para o processo reacional e de mistura. Tais bolhas precisam ser controladas para que não causem nenhum dano ou erosão no equipamento, ocasionando uma perda de performance. Este controle é vindo de fábrica, elaborado e patenteado pelo fabricante.

Nesta bomba, o óleo será pressurizado à pressões de 40 à 80 bar e enviado para o reator, aonde terá um tempo de residência de aproximadamente 1 hora e 30 minutos. Este tempo de residência é necessário para que todas as reações da seção 2.1 sejam concluídas, ou seja, para que os fosfatídeos não-hidratáveis tornem-se hidratáveis, para que os ácidos graxos livres e o ácido fosfórico remanescente sejam neutralizados.

A pressão de saída do nanoreator gira em torno de 3 à 4 bar, tornando possível a alimentação direta deste óleo em um separador centrífugo.

Na etapa de centrifugação, a diferença de vazão da entrada e saída neste equipamento reduzirá, comparado ao processo tradicional, pois menor será o volume de óleo arrastado para a fase aquosa (borra). [10]

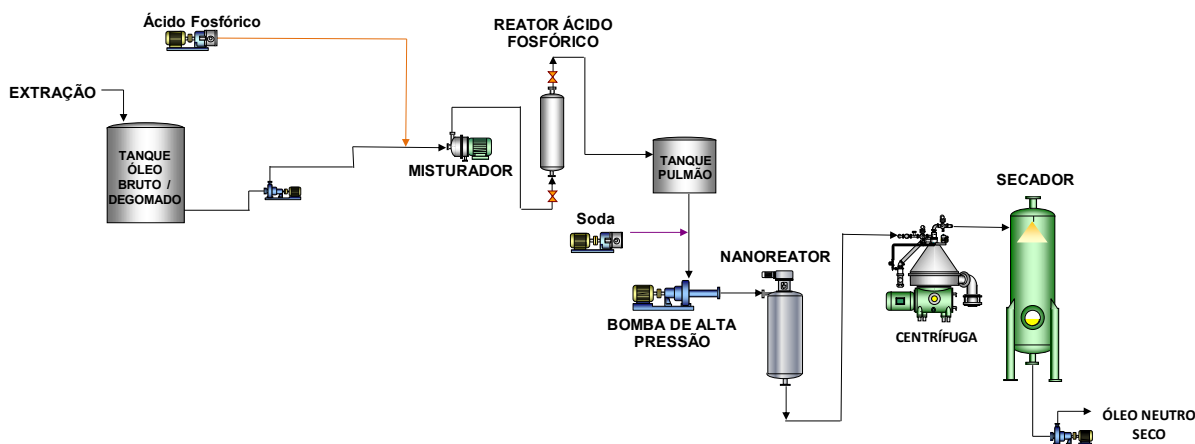


Figura 17 - Fluxograma da nanoneutralização de óleo de soja

4. CONCLUSÃO

A tecnologia e o agronegócio caminham juntos para o desenvolvimento da humanidade. A nanocavitação veio para atuar nestes dois meios e obteve sucesso na área de refino de óleo de soja, trazendo inúmeros benefícios ao processo, tanto em qualidade, como em eficiência.

A bomba de engrenagens de alta pressão projetada para cavar sob controle, juntamente com o nanoreator, são capazes de produzir nanobolhas, aumentando drasticamente a superfície de contato reagentes-óleo. Assim, as reações para eliminação dos fosfatídeos e dos ácidos graxos livres tornaram-se mais eficientes, promovendo uma redução de 90% de consumo de ácido fosfórico e 30% de soda cáustica.

Além dos benefícios reacionais diretos, ocorre um menor arraste de óleo na borra na centrifugação e uma redução de 50% no consumo de sílica

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABIOVE. Balanço de oferta e demanda. 2017.
- [2] ABRASEM. Moratória da soja. 2016.
- [3] COELHO, W. R. Análise do fenômeno de cavitação em bomba centrífuga. 2006. 267 f. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2006.
- [4] DORSA, R. Tecnologia de processamento de óleos e gorduras vegetais e derivados. 3 ed. Campinas: Ideal. 2004.
- [5] ERNEST, Walter. Oil hydraulic power and its industrial applications. 2 ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Book Company. 1960.
- [6] GREIN, H.; WYSS, E. Cavitation – and overview. Zurique: Sulzer Research Number. 1974.
- [7] KNAPP, R. T.; DAILY, J. W.; HAMMITT, F. G. Cavitation. Nova Iorque: MacGraw-Hill. 1970.
- [8] MAPA. Portaria 795/1993.1993.
- [9] MATTOS, E. E.; FALCO, R. Bombas industriais. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência. 1998.
- [10] Nano neutralising – 2015. DESMET BALLESTRA. Disponível em: <<http://www.nanoneutralization.com/>>. Acesso em 15 julho 2017.
- [11] OLIVEIRA, S. Estudo das unidades de desgomagem e neutralização. 2012. 85 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.
- [12] ROHR, R. Óleo e gorduras vegetais, seus subprodutos proteicos. 4 ed. Campinas: 1978.
- [13] Soja e suas riquezas – História – 2011. FIESP. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/sindimilho/sobre-o-sindmilho/curiosidades/soja-e-suas-riquezas-historia/>>. Acesso em: 10 jan. 2017.
- [14] VON LINSIGEN, I. Fundamentos de sistemas hidráulicos. 2 ed. Santa Catarina: UFSC. 2001.