



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**



LUÍS GABRIEL PIRES OTTONELLI

**O PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÓLEO DE SOJA:
DA SEMENTE AO PRODUTO FINAL**

**UBERLÂNDIA
2023**

LUÍS GABRIEL PIRES OTTONELLI

**O PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÓLEO DE SOJA:
DA SEMENTE AO PRODUTO FINAL**

Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Mauro da Silva
Neiro

UBERLÂNDIA

2023

LUÍS GABRIEL PIRES OTTONELLI

**O PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÓLEO DE SOJA:
DA SEMENTE AO PRODUTO FINAL**

Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Química.

Uberlândia, 01 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sérgio Mauro da Silva Neiro – Orientador (FEQ – UFU)

Prof. Dr. Adilson José de Assis (FEQ – UFU)

Prof. Dr. Thiago Vaz da Costa (FEQ – UFU)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de concluir uma etapa tão importante da minha vida, por ter me dado condições de passar por todo esse processo com saúde e sem dificuldades.

Agradeço aos meus pais por todo esforço, apoio e paciência. Nada disso teria sido possível sem vocês. São a minha base e espero poder retribuir tudo que já fizeram e ainda fazem por mim.

Agradeço o apoio da minha irmã Rafa. Obrigado por sempre acreditar no meu potencial e ser sempre tão presente mesmo estando longe.

Agradeço a minha namorada Aryelli. Você foi uma mudança de chave na minha vida. Obrigado por todo apoio e puxões de orelha. A vida com você é mais leve e eu amo cada segundo ao seu lado.

Agradeço a todos os meus amigos de Uberlândia, em especial ao Kaoander e Layton. Obrigado por todos os momentos de alegria, parceria e companheirismo. Sem dúvidas, a minha jornada foi muito melhor porque vocês estiveram presentes.

E não poderia deixar de agradecer ao meu professor e orientador Sérgio, que teve paciência com minhas mudanças de tema e sempre me ajudou com todas as minhas dúvidas.

RESUMO

A soja é uma das culturas mais cultivadas no mundo, utilizada principalmente para a produção de óleo comestível e ração animal. O método mais comum para extrair o óleo de soja é a extração por solvente. Esse processo começa com a preparação dos grãos, que inclui aquecimento, quebra, remoção das cascas e laminação, para aumentar a área de contato com o solvente e otimizar a extração. Após a extração, o óleo é separado do solvente e refinado em quatro etapas: degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização, para melhorar a cor, sabor e odor. O solvente é recuperado e reutilizado, e os flocos de soja sem óleo são transformados em farelo, usado na alimentação animal. Além do óleo e do farelo, o processo também gera subprodutos valiosos, como pellets de casca, lecitina, destilados para a indústria farmacêutica e borra para graxas e fertilizantes.

Palavras-chave: Óleo; Soja; Refino; Extração.

ABSTRACT

Soybeans are one of the most widely cultivated crops globally, primarily used for producing edible oil and animal feed. The most common method for extracting soybean oil is solvent extraction. This process begins with the preparation of the beans, which involves heating, cracking, dehulling, and flaking to increase the surface area for optimal oil extraction. After extraction, the oil is separated from the solvent and refined through four stages: degumming, neutralization, bleaching, and deodorization, to improve its color, flavor, and odor. The solvent is recovered and reused, and the oil-free soybean flakes are processed into meal, used in animal feed. In addition to oil and meal, the process also produces valuable byproducts, such as soybean hull pellets, lecithin, deodorizer distillates for the pharmaceutical industry, and soapstock for greases and fertilizers.

Keywords: Oil; Soybean; Refining; Extraction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico da produção de óleos vegetais em 2022/23	1
Figura 2 - Fluxograma das etapas para produção de óleo de soja	5
Figura 3 - Moinho de quebra	8
Figura 4 - Pellets de casca de soja	9
Figura 5 - Configuração básica de um laminador	10
Figura 6 - Flocos de soja laminado	11
Figura 7 - Extrator de correia com recirculação de micela	12
Figura 8 - Dessolventizador-Tostador Crown/Schumacher	14
Figura 9 - Farelo de soja	15
Figura 10 - Fluxograma das etapas que ocorrem após a extração	16
Figura 11 - Filtro de folhas de pressão vertical	25
Figura 12 - Fluxograma das etapas do processo de refinamento de óleo bruto	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de composição dos componentes do óleo de soja bruto e refinado	18
---	----

SUMÁRIO

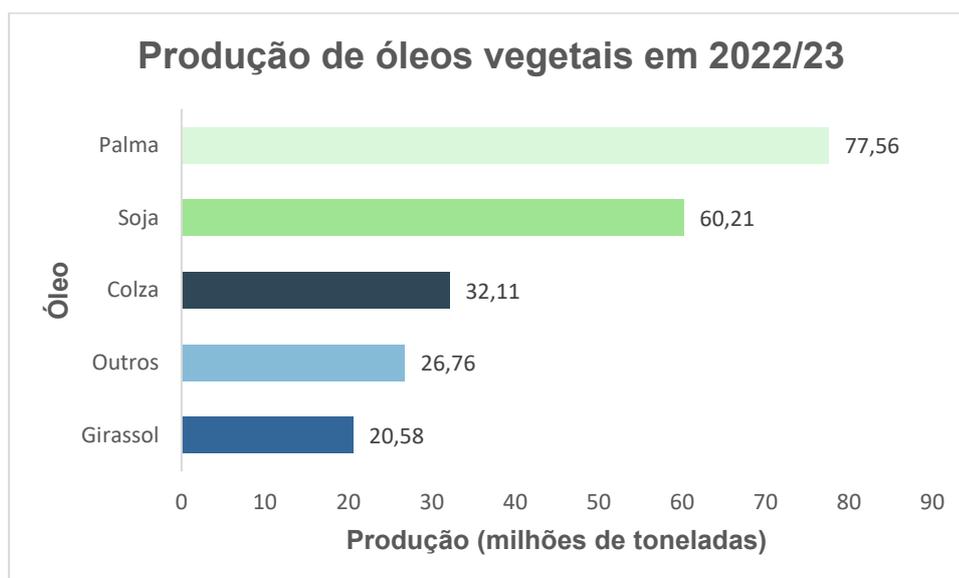
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVO	3
2. VISÃO GERAL DO PROCESSO DE PRODUÇÃO	4
3. PROCESSO DE EXTRAÇÃO	6
3.1. LIMPEZA.....	6
3.2. CONDICIONAMENTO	7
3.3. QUEBRA.....	8
3.4. LAMINAÇÃO	9
3.5. EXTRAÇÃO	11
3.6. RECUPERAÇÃO DO SOLVENTE	13
4. PROCESSOS FUNDAMENTAIS DE REFINO DE ÓLEO DE SOJA.....	17
4.1. DEGOMAGEM.....	18
4.1.1. DEGOMAGEM AQUOSA	19
4.1.2. DEGOMAGEM ÁCIDA.....	20
4.1.3. DEGOMAGEM ENZIMÁTICA.....	21
4.2. DESACIDIFICAÇÃO	21
4.3. BRANQUEAMENTO	23
4.4. DESODORIZAÇÃO.....	25
5. PRODUTOS DERIVADOS.....	28
5.1. LECITINA.....	28
5.2. DESTILADO DE DESODORIZADOR	28
5.3. BORRA DE SABÃO	30
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
REFERÊNCIAS	33

1. INTRODUÇÃO

A humanidade tem utilizado óleos vegetais por séculos. Nozes com óleo e gorduras de animais foram consumidas como fontes de energia muito antes do desenvolvimento de conceitos nutricionais. Além disso, os óleos foram empregados desde cedo como fonte de iluminação, como medicamentos, em rituais religiosos e na aplicação a armas e utensílios. Os óleos antigos do Oriente Médio, como os de gergelim e azeite de oliva, eram altamente valorizados devido à sua notável durabilidade (GUPTA, 2017).

O mercado global de óleos vegetais é de suma importância tanto para o setor agrícola quanto para a indústria de alimentos, desempenhando um papel crucial na oferta de matérias-primas essenciais. Os óleos vegetais, que podem ser encontrados em sua forma bruta para uso industrial ou refinados para o consumo humano, são compostos por produtos agrícolas fundamentais, tais como óleo de palma, óleo de soja, óleo de colza (canola) e óleo de girassol, os quais, de forma combinada, representaram a maior parte da produção mundial em 2022/23, atingindo um expressivo índice de 87,7%, conforme dados disponibilizados pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (ZEFERINO; RAMOS, 2023). A produção de óleos vegetais está distribuída como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Gráfico da produção de óleos vegetais em 2022/23



Fonte: Imagem do autor

Os óleos vegetais são extraídos de várias partes de plantas. As fontes mais comuns de óleos vegetais incluem a colza, o girassol, a soja, as azeitonas e o gergelim. A produção global de óleos vegetais está em crescimento, o que tem reduzido a preferência pelas gorduras de origem animal. Em relação à sua composição química, os óleos vegetais são compostos por misturas de ésteres de ácidos graxos saturados e insaturados. Os ácidos graxos poli-insaturados são nutrientes valiosos na alimentação humana (SZYCZEWSKI, 2016).

No mercado global de óleos vegetais, dois protagonistas se destacam: o óleo de palma, liderando tanto a produção quanto o consumo global, com a Indonésia e a Malásia desempenhando papéis fundamentais nesse cenário, e o óleo de soja, que ocupa a segunda posição em produção e consumo. China, Estados Unidos e Brasil desempenham funções de destaque no mercado de óleo de soja, sendo relevante observar a notável dependência da China em importações de soja em grão para a produção desse óleo (ZEFERINO; RAMOS, 2023).

A produção de óleo de soja representa um setor de destaque no cenário global do agronegócio. O Brasil, sendo um dos principais produtores desse bem, encara uma considerável competição no âmbito internacional com outras nações produtoras. Para manter sua competitividade nesse contexto, é essencial dedicar um esforço significativo ao aprimoramento não apenas do processo de refino, mas de todo o processo de produção, visando à obtenção de óleo de alta qualidade com custos operacionais reduzidos.

A obtenção de um óleo de alta qualidade inicia-se com um processo criterioso desde a seleção dos grãos. Nesse estágio, é crucial realizar uma triagem minuciosa, eliminando quaisquer impurezas, como grãos ardidos, queimados, ou em estado de deterioração, bem como grãos verdes indesejáveis. Caso os grãos apresentem alto teor de umidade, é necessário submetê-los a um processo de secagem. Após a seleção inicial, os grãos passam por uma fase de preparação que engloba condicionamento, quebra, remoção das cascas e laminação para formação de flocos, visando facilitar a subsequente extração do óleo.

Uma vez que a preparação esteja completa, prossegue-se com o processo de extração do óleo. O resultado desse processo é um óleo bruto que,

posteriormente, passará por etapas de refinamento. Simultaneamente, os flocos obtidos são separados do solvente e transformados em farelo.

Os procedimentos de refinamento têm a finalidade de eliminar substâncias que não são desejadas (como fosfolipídios, monoacilgliceróis, diacilgliceróis, ácidos livres, corantes e pigmentos, materiais oxidados, compostos de sabor, metais em pequenas quantidades, compostos de enxofre e poluentes). Contudo, eles também têm o potencial de remover elementos menores de valor, como antioxidantes e vitaminas, como os carotenos e tocoferóis. Portanto, é crucial que os processos de refinamento sejam planejados de forma a otimizar a remoção dos componentes indesejados e minimizar a eliminação dos componentes menores valiosos (GUNSTONE, 2011).

1.1. OBJETIVO

O propósito deste estudo consiste em realizar uma revisão abrangente do ciclo de produção do óleo de soja, englobando desde a etapa inicial de recepção dos grãos até a obtenção do produto final, com o intuito de assegurar a máxima qualidade do óleo resultante.

2. VISÃO GERAL DO PROCESSO DE PRODUÇÃO

A transformação da soja em óleo comestível é um processo de relevância significativa na indústria de alimentos, dadas as inúmeras etapas complexas que engloba. Inicialmente, o processo tem início na fase de recepção dos grãos de soja, onde se procede à avaliação criteriosa da qualidade dos grãos. Esta avaliação abrange diversos aspectos, tais como o tamanho, presença de impurezas, bem como a detecção de grãos com características adversas, como ardidados, queimados e esverdeados. Adicionalmente, mede-se o teor de umidade dos grãos, antes de serem submetidos ao armazenamento.

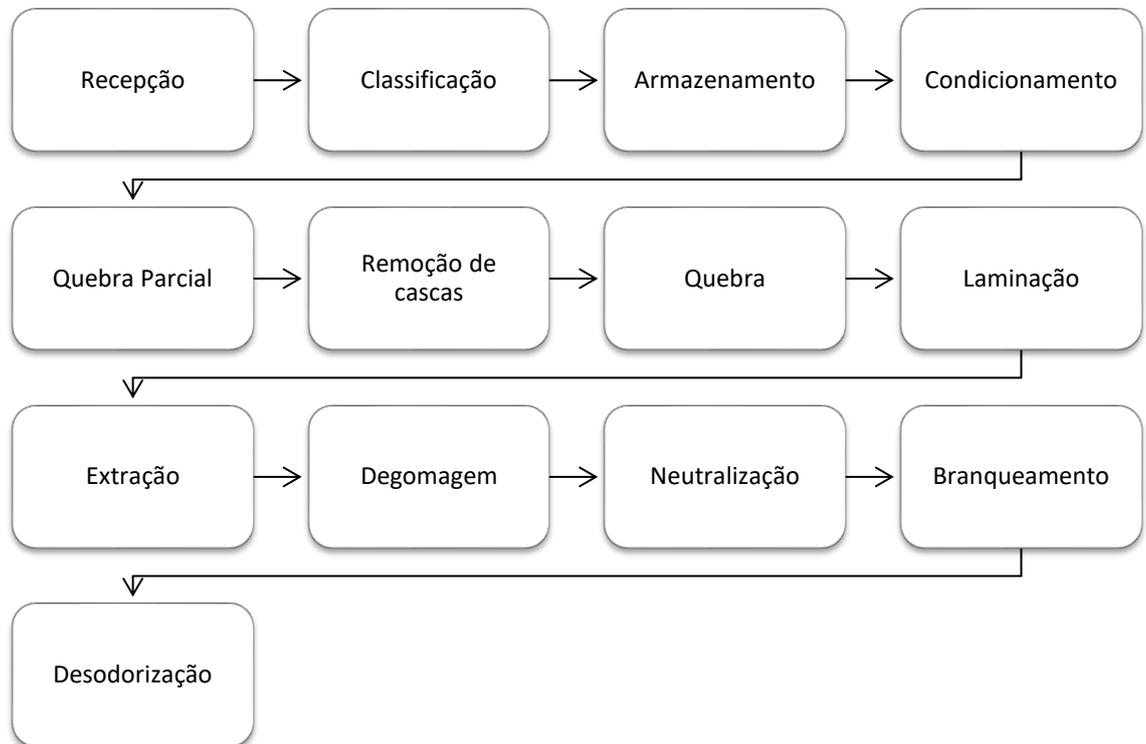
Após o processo de avaliação da qualidade, os grãos de soja são encaminhados para a etapa de preparação, a qual visa acondicionar os grãos de forma a tornar possível a extração do óleo. Esta fase de preparação dos grãos consiste em uma sequência de procedimentos, incluindo o condicionamento das sementes, a quebra parcial dos grãos, a remoção das cascas, a quebra mais fina dos grãos, o processo de laminação e, finalmente, a extração do óleo utilizando hexano como solvente. Como resultado deste processo, obtém-se o óleo bruto, que passa, então, por uma etapa subsequente, o refino, enquanto o farelo remanescente é destinado à produção de ração animal.

A fase de refino do óleo é composta por quatro etapas distintas, a saber: degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização. O propósito do refino consiste na eliminação de compostos indesejados presentes no óleo bruto, os quais podem afetar adversamente características cruciais como a cor, sabor e odor. Essas etapas de refinamento visam, portanto, aprimorar a qualidade do óleo, tornando-o apto para o consumo humano.

Uma vez finalizadas todas as etapas mencionadas, o óleo de soja atinge a sua condição pronta para consumo, cumprindo, assim, todo o ciclo de transformação da soja em um produto seguro e apropriado para a alimentação humana.

A sequência das etapas está descrita no fluxograma da Figura 2 abaixo:

Figura 2 - Fluxograma das etapas para produção de óleo de soja



Fonte: Imagem do autor

3. PROCESSO DE EXTRAÇÃO

Quando se trata da fabricação de óleo de soja, há dois métodos amplamente utilizados para a extração, a saber, a extração por solvente e a prensagem mecânica. A técnica convencional em instalações de processamento modernas atualmente é a extração por solvente, que envolve o uso de hexano, conforme analisado por Johnson, White e Galloway em 2008.

O processo de extração por solvente compreende três etapas principais: preparação das sementes, extração do óleo e remoção do solvente do óleo e do farelo. Na preparação convencional das sementes, as etapas incluem secagem, limpeza, trituração, opcionalmente a retirada das cascas, condicionamento e laminação das sementes. A expansão após a laminação é uma opção utilizada para aprimorar a extração do óleo, a percolação e o escoamento do solvente, resultando em um aumento considerável da capacidade de produção. Em uma abordagem alternativa na preparação das sementes (despolpamento a quente), as cascas são retiradas das sementes divididas após passarem por um processo de aquecimento intercalado, lento e rápido, antes da trituração e laminação. Esse método de despolpamento a quente é mais eficiente do ponto de vista energético em comparação ao despolpamento convencional (GUNSTONE, 2011).

3.1. LIMPEZA

A principal função de qualquer instalação de preparação de sementes é processar as sementes de modo que, em circunstâncias normais, a extração de óleo na usina de extração por solvente seja economicamente viável.

Tipicamente, quando a soja chega de fazendas ou elevadores, é submetida a um processo de limpeza para eliminar caules, folhas, vagens, grãos quebrados, sujeira, pedras e sementes indesejadas, utilizando peneiras e aspiradores. É geralmente benéfico remover a maior parte das cascas, uma vez que possuem teores de óleo muito baixos (<1%) e proteína. As cascas compõem cerca de 7-8% do peso total das sementes de soja. Remover as cascas ajuda a reduzir a quantidade de material que segue para operações mais dispendiosas e aumenta o teor de proteína no farelo. Esse processo eleva o teor de proteína no farelo em cerca de quatro pontos percentuais (ou seja, de 44% no farelo de soja extraído por solvente sem descascar para 48-49%) e reduz o teor de fibras (de 7,0 para menos de 3,3%) (GERDE et al., 2020).

A limpeza das sementes de soja é um procedimento essencial não só pelos motivos citados acima. Além destes, a eliminação dos detritos é crucial em termos de higiene, uma vez que é neles que as bactérias se concentram. É igualmente importante a remoção de areia, a fim de prevenir o desgaste excessivo em todas as máquinas e transportadores, com foco especial nos rolos de trituração e laminação (SERRATO, 1981).

Se as sementes já foram previamente limpas antes do armazenamento, a etapa de limpeza subsequente pode ser simplificada. O primeiro passo na limpeza é a remoção de metais usando um separador magnético rotativo. Folhas de metal perfuradas são empregadas para separar detritos de tamanho excessivo e, logo abaixo, há uma segunda peneira para eliminar a areia. Para separar partículas leves (principalmente cascas e poeira), a segunda peneira também deve ser equipada com um canal de aspiração. (CHEMAT, 2017).

3.2. CONDICIONAMENTO

Essa operação é semelhante ao processo de cozimento, utilizado na preparação das sementes para a extração mecânica, porém é mais suave. O objetivo aqui não é alcançar um cozimento completo, que envolve a ruptura das paredes celulares pela explosão de vapor de água dentro das células, mas apenas preparar os grãos adequadamente para uma ação eficaz de laminação.

Na maioria das plantas, a soja é aquecida a 72-75°C e condicionada por 18-20 minutos. No entanto, um tempo mais longo (25-30 minutos) a uma temperatura mais baixa (70-72°C) contribui para uma melhor uniformidade no condicionamento. Na verdade, há uma tendência atual para um condicionamento ainda mais lento, de 40 minutos a 65°C. A faixa de umidade ideal para a laminação é de 10-11%. Caso os grãos estejam secos, vapor d'água pode ser injetado para elevar a umidade para 10-10,5%. Para grãos muito secos, com teor de umidade de 6-7%, como é comum na Ásia e África durante a entressafra, água quente pode ser borrifada na primeira seção do condicionador, até 2%, e vapor pode ser injetado na segunda seção, para elevar a umidade para a faixa necessária. No entanto, não é recomendável adicionar mais de 2% de água, pois parte dela pode permanecer na superfície dos grãos e causar problemas na operação de laminação. Além disso, é importante garantir que a água seja borrifada de maneira uniforme em toda a cama de sementes (VADKE, 2024).

3.3. QUEBRA

Para produzir flocos finos e amplamente utilizados de soja na sala de preparação, é essencial que os grãos sejam quebrados em pedaços menores e que as cascas sejam separadas da polpa. A quebra dos grãos é realizada com o auxílio de um "quebrador" ou moinho de quebra, configurado de acordo com o tamanho desejado dos pedaços que geralmente varia entre 6 e 10 mesh. Isso é fundamental para otimizar a eficiência do processo. O moinho é ajustado para produzir diferentes graus de quebra, embora seja comum a produção de pedaços maiores e menores, o que representa um compromisso no padrão de quebra ideal (SERRATO, 1981). A Figura 3 apresenta o quebrador que normalmente é utilizado em grandes indústrias para a produção de óleo de soja.

Figura 3 - Moinho de quebra



Fonte: BUHLER GROUP (s.d.)

Para atender aos requisitos de produção de flocos e farelo de alta proteína, é necessário que menos de 20% dos grãos quebrados tenham pedaços maiores que 6 mesh e menos de 3% tenham pedaços menores que 20 mesh. Além de dimensionar os grãos para o processo de laminação, a quebra também serve para separar as cascas da polpa. Isso geralmente é realizado em várias etapas de separação, resultando em polpa limpa, cascas limpas e resíduos. Os

resíduos são encaminhados para um separador de gravidade, onde a polpa é recuperada. As cascas puras são posteriormente tostadas, moídas e enviadas para embalagem e armazenamento. (SERRATO, 1981).

O procedimento pelo qual as cascas são submetidas é conhecido como peletização. Esse processo envolve a compressão das cascas, transformando-as em pequenos cilindros, conforme ilustrado na Figura 4. Os pellets resultantes são empregados como componente na nutrição animal.

Figura 4 - Pellets de casca de soja



Fonte: Imagem do autor

A eficácia da operação de quebra deve ser verificada por meio de análises de peneira, garantindo que os grãos não quebrados e as divisões não excedam 3% e 5%, respectivamente. Grãos com alto teor de umidade, superior a 11,5%, podem ser difíceis de quebrar e, nesse caso, requerem secagem antes da quebra, com métodos como ar quente em silos grandes ou condicionadores verticais. A qualidade da quebra dos grãos é fundamental, principalmente quando se processam grãos para obtenção de farelo de alta proteína (VADKE, 2024).

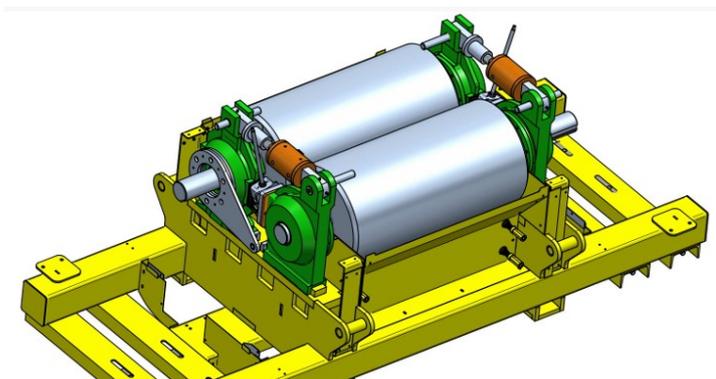
3.4. LAMINAÇÃO

A laminação de soja é uma etapa crucial na preparação para extração, afetando significativamente o desempenho da planta de extração por solvente. Nessa fase, os grãos condicionados a vapor são achatados até atingirem uma espessura de 0,28 a 0,30 mm. O objetivo é desestruturar completamente os grãos, rompendo o maior número possível de paredes celulares. No entanto, a espessura dos flocos deve ser cuidadosamente controlada, pois flocos muito

finos podem resultar em compactidade excessiva, dificultando a percolação do solvente e exigindo mais energia no processo de laminação (VADKE, 2024).

Segundo Erickson (1995), a espessura dos flocos geralmente varia entre 0,2 mm e 0,5 mm. Essa faixa de espessura permanece válida até os dias de hoje, ficando a cargo da indústria a escolha pela faixa mais adequada às necessidades do seu processo. A tradição da laminação da soja envolve o uso de laminadores, que consistem em um par de rolos de grande diâmetro com superfície lisa. A espessura dos flocos é controlada ajustando a pressão entre os rolos. Os rolos dos laminadores são projetados para proporcionar um fluxo uniforme de soja quebrada, garantindo carga e desgaste uniformes. A configuração básica de um laminador é ilustrada abaixo na Figura 5.

Figura 5 - Configuração básica de um laminador



Fonte: WAKELY ENGINEERING (s.d.)

No caso de processos adicionais, como expansão, flocos mais espessos podem ser permitidos, chegando a até 0,4 mm. No entanto, isso requer condicionamento dos flocos a temperaturas específicas (VADKE, 2024). O controle da espessura dos flocos é essencial, e amostras são regularmente retiradas para medição, com registros mantidos em um registro operacional (ERICKSON, 1995). É esperado que os flocos após a laminação se assemelhem ao que é mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Flocos de soja laminado



Fonte: Imagem do autor

3.5. EXTRAÇÃO

A extração de óleo de soja envolve a utilização de solvente para dissolver o óleo dos grãos de soja previamente preparados. Esse processo de difusão é realizado em um extrator que promove o contato físico entre o solvente e os sólidos, que podem ser os grãos de soja. Há duas abordagens para esse contato: imersão dos sólidos no solvente ou percolação do solvente através de uma cama de sólidos (ERICKSON, 1995).

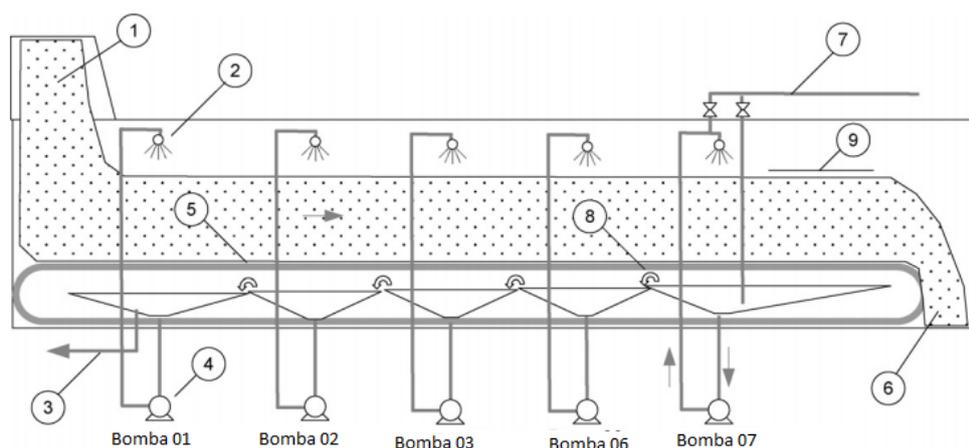
A tendência moderna favorece a percolação, na qual flocos de soja são combinados com um fluxo contracorrente de flocos e micela (mistura de óleo e hexano) (ERICKSON, 1995). A construção da planta de extração deve ser à prova de explosão e vapor devido à alta inflamabilidade e volatilidade do hexano. O extrator é projetado para que o solvente flua contracorrente em relação aos flocos, permitindo que o solvente lave os flocos antes de serem descarregados. A solução resultante de óleo e solvente, conhecida como micela, é bombeada para as etapas de evaporação (SERRATO, 1981).

Um dos modelos de extrator utilizados atualmente é mostrado na Figura 7. De acordo com Almeida, Ravagnani e Modenes (2010), os flocos de soja entram no extrator (1) e são transportados pela correia (5) até a saída do equipamento (6). A extração ocorre pela correia, à medida que os flocos passam por cada chuveiro. A área da seção de percolação, devido ao chuveiro correspondente, é proporcional à vazão de micela do chuveiro. No espaço de drenagem (9), a micela com baixa concentração de óleo flui dos espaços entre as partículas do material bruto e cai no compartimento da Bomba 07.

O solvente entra no extrator por um tubo, sendo direcionado para a Bomba 07 ou para seu chuveiro manipulando as válvulas da linha. Cada bomba recircula a micela para o banho localizado acima dela. Após transbordar por todos os portões de alimentação, a micela deixa a Bomba 01 e é enviada para a destilaria (3). A concentração de óleo na micela na seção de saída varia entre 30 e 35%, dependendo das condições operacionais.

A grande vantagem desse tipo de extrator, em comparação com outros modelos existentes que não possuem recirculação de micela, é que a taxa de fluxo de solvente em cada banho é independente da quantidade de solvente puro que entra no equipamento. Dessa forma, mesmo com uma pequena quantidade de solvente recirculando na planta de extração, o banho do extrator pode ser ajustado para a taxa mínima de fluxo de leito permitida.

Figura 7 - Extrator de correia com recirculação de micela



Fonte: ALMEIDA; RAVAGNANI; MODENES (2010)

A extração com solvente é o método padrão na indústria de processamento de soja. O hexano é recuperado do óleo extraído e dos flocos, sendo posteriormente reciclado. No entanto, a extração com solvente é regulamentada devido às emissões de hexano, exigindo um design e operação cuidadosos dos equipamentos para atender a essas regulamentações (GUNSTONE, 2011).

Além dos métodos tradicionais, há um crescente interesse em processos de extração aquosa que não utilizam solventes orgânicos, tornando o processo mais ecológico. Esses processos envolvem a mistura de flocos de soja com água, adição de enzimas para desestabilizar a emulsão óleo-água e a

recuperação do óleo por meio de centrifugação. Essas abordagens alternativas oferecem soluções mais sustentáveis e podem atender às demandas por produtos de soja de alta qualidade e ambientalmente amigáveis (GUNSTONE, 2011).

3.6. RECUPERAÇÃO DO SOLVENTE

O solvente é recuperado e reciclado com um mínimo de perdas. O solvente sai do extrator como uma micela e é removido por evaporação de duplo efeito e strip de vapor. Vapores de vapor e solvente do desengordurador são usados para aquecer o evaporador de primeira etapa, concentrando a micela. A micela é posteriormente bombeada para o evaporador de segunda etapa para maior concentração (ERICKSON, 1995).

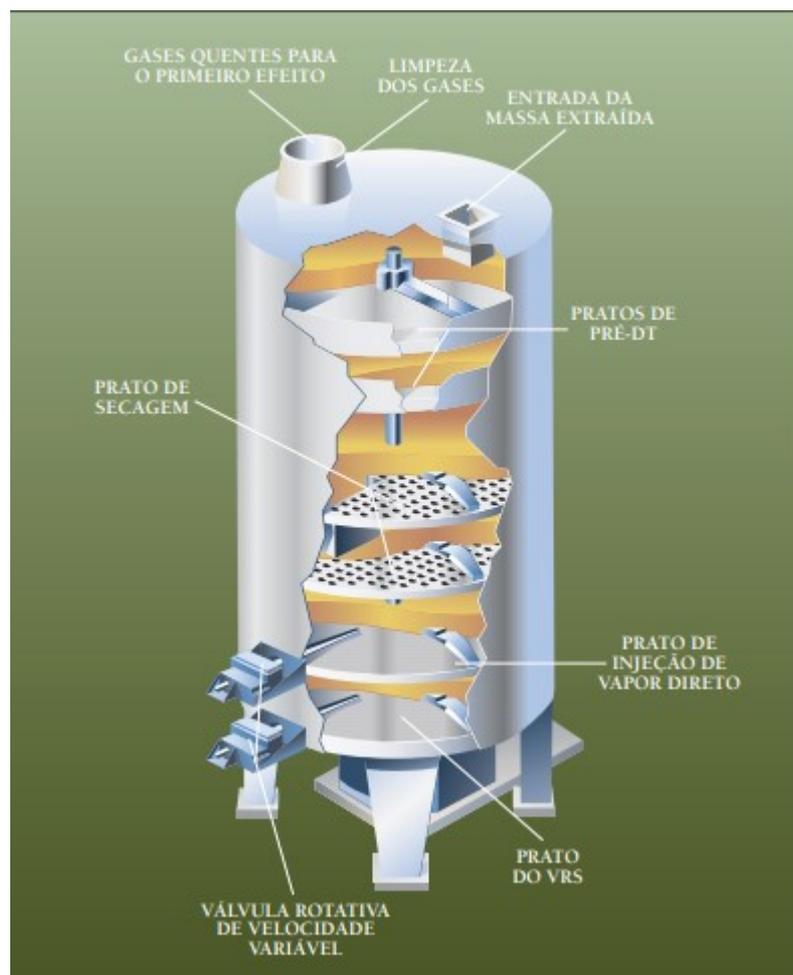
A remoção do hexano da micela é realizada por meio de aquecimento em evaporadores de tubo e separação em uma coluna de destilação a vácuo final. O óleo resultante deve atender a um teste de ponto de fulgor negativo. Os flocos extraídos passam por um processo de desengorduramento para eliminar completamente o hexano e ajustar o teor de umidade. Os flocos resultantes são geralmente moídos (SERRATO, 1981).

A remoção eficiente do hexano dos flocos gastos de soja é crucial, e vários parâmetros, como temperatura, umidade e tempo, afetam esse processo. É importante utilizar vapor vivo suficiente na operação de dessolventização para alcançar a tostagem ideal. O design do Dessolventizador e Tostador (DT) Schumacher com orifícios no fundo duplo melhorou a eficiência da dessolventização. Um indicador de injeção de vapor suficiente é a temperatura dos gases que saem do DT (VADKE, 2024).

O DTDC (Dessolventizador Tostador Dryer Cooler) é um sistema popular que envolve etapas de secagem e resfriamento abaixo do DT, sendo amplamente utilizado nas fábricas de extração de soja em todo o mundo. No entanto, o DTDC é o equipamento que consome mais energia e onde ocorrem a maioria das perdas de solvente. Portanto, a otimização do DTDC é fundamental para um processo eficaz (VADKE, 2024).

A Figura 8 ilustra o DT desenvolvido pela Crown, que é uma das principais fornecedoras de tecnologia de extração de óleo de sementes.

Figura 8 - Dessolventizador-Tostador Crown/Schumacher



Fonte: EUROPA CROWN (s.d.)

De acordo com a Crown (s.d.), o equipamento opera por meio de uma entrada superior que distribui uniformemente a massa carregada de solvente nos pratos de pré-dessolventização. Há uma movimentação da massa de um prato para outro por aberturas nos pisos, sendo os pratos superiores responsáveis pelo aquecimento indireto para evaporar o hexano sem aumentar a umidade.

Os pratos principais foram projetados para aquecimento indireto e injeção direta de vapor, removendo a maior parte do solvente do farelo e adicionando a água necessária para o cozimento. Estes pratos possuem orifícios estrategicamente posicionados para permitir um contato ideal entre os gases e o farelo, com vapores em contracorrente ao movimento da massa. A altura do farelo em cada prato é controlada por comportas, permitindo o descarregamento do material pelo equipamento.

O prato inferior, conhecido como Prato de Aspersão, mantém o nível do produto na câmara e remove o solvente residual do farelo, passando pelos orifícios reforçados e pelos leitos de farelo dos pratos acima. A disposição e quantidade dos pratos visam otimizar o contato entre vapores hexano/água e massa, mantendo a umidade apropriada em cada estágio do processo. Isso resulta em uma dessolventização eficaz, reduzindo significativamente a quantidade de solvente no farelo.

Após a eliminação do hexano da micela, o óleo bruto é direcionado para a fase de refino, representando a etapa final antes de sua adequação para o consumo humano. O hexano é armazenado em tanques para futura reutilização, enquanto os resíduos de flocos gastos restantes são combinados com goma, um subproduto do processo de degomagem, a fim de enriquecer sua composição nutricional. Posteriormente, estes resíduos são desidratados, moídos e convertidos em farelo (ilustrado na Figura 9), um produto de elevado valor comercial amplamente empregado na alimentação animal.

O farelo resultante pode também ser mesclado com cascas não utilizadas no processo de peletização, visando aumentar o teor de fibras e manter-se em conformidade com os padrões de especificação almejados.

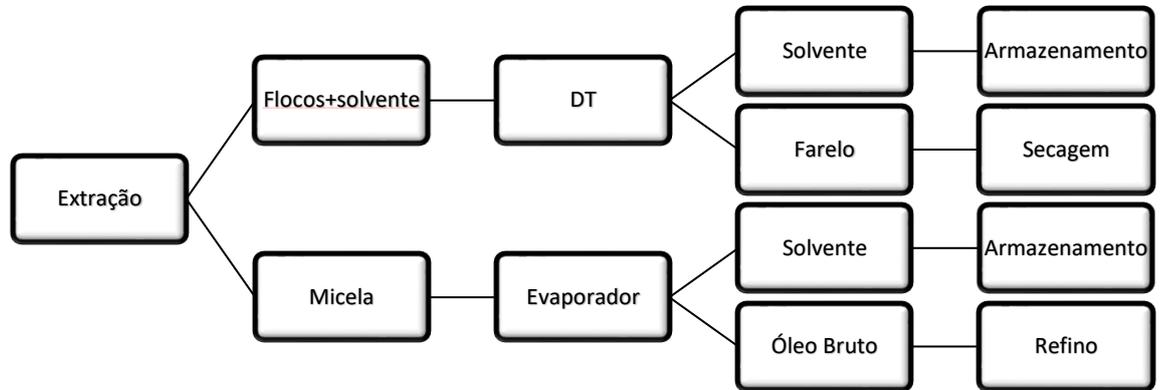
Figura 9 - Farelo de soja



Fonte: Imagem do autor

A Figura 10 ilustra um fluxograma das etapas de recuperação do solvente após a extração e o destino de cada componente após a separação.

Figura 10 - Fluxograma das etapas que ocorrem após a extração



Fonte: Imagem do autor

4. PROCESSOS FUNDAMENTAIS DE REFINO DE ÓLEO DE SOJA

O óleo de soja bruto geralmente passa por um processo que envolve etapas de degomagem, refino alcalino, branqueamento e desodorização para resultar em um óleo sem odor, de sabor suave e com boa estabilidade à oxidação, tornando-o atraente para os consumidores. Cada etapa desse processo tem funções específicas de eliminar certos compostos em quantidades mínimas que podem influenciar negativamente ou positivamente a qualidade do óleo. A degomagem remove fosfolipídios e gomas mucilaginosas. O refino alcalino elimina ácidos graxos livres, fosfolipídios, metais e clorofilas. O branqueamento reduz a presença de clorofilas, carotenoides, peróxidos e sais residuais de ácidos graxos. Por fim, a desodorização retira compostos voláteis, carotenoides, ácidos graxos livres e tocoferóis, além de decompor peróxidos para melhorar a qualidade do sabor e a estabilidade do óleo (JUNG; YOON; MIN, 1989).

A eliminação destes constituintes é de fundamental importância para a obtenção de um produto de elevada qualidade, direcionado ao consumo final. Os ácidos graxos livres manifestam-se como causadores de sabores desagradáveis, muitas vezes caracterizados por ranço, e provocam a liberação de fumaça quando o óleo é submetido a processos de aquecimento, além de encurtarem a vida útil do produto acabado. Por sua vez, os fosfatídeos propiciam a formação de emulsões em presença de água, tendem a aderir a superfícies aquecidas e ocasionam a formação de espuma em óleos destinados à fritura. A presença de pigmentos contribui para a coloração excessiva do óleo, tornando-o inadequado para suas aplicações usuais, e, por conseguinte, reduzindo a sua vida útil. Compostos de sabor indesejado, ao serem submetidos a temperaturas elevadas, acarretam características indesejáveis de sabor, coloração e liberação de fumaça. Os contaminantes devem ser estritamente removidos, não apenas em consideração à segurança alimentar, mas também para atender aos preceitos regulatórios locais vigentes. A Tabela 1 contém a composição do óleo bruto proveniente da soja e o padrão esperado após o refino.

Tabela 1 - Faixa de composição dos componentes do óleo de soja bruto e refinado

Componentes	Óleo bruto	Refinado
Triacilgliceróis (%)	95-97	>99
Fosfatídeos	1,5-2	0,003-0,045
Matéria insaponificável	1,6	0,3
Esteróis (%)	0,33	0,13
Tocoferóis (%)	0,15-0,21	0,11-0,18
Hidrocarbonetos (%)	0,014	0,01
Ácidos graxos livres	0,3-0,7	<0,05
Ferro (ppm)	1-3	0,1-0,3
Cobre (ppm)	0,03-0,05	0,02-0,06

Fonte: ERICKSON (1995).

4.1. DEGOMAGEM

Os fosfolipídios, também chamados de fosfatídeos, desempenham um papel fundamental na estrutura celular das plantas. São comumente referidos como "goma". Essas substâncias, devido à sua solubilidade em óleo, são extraídas das sementes juntamente com o óleo bruto e permanecem nele. (GUPTA, 2017).

Segundo Gupta (2017), o óleo bruto deve ser degomado antes do armazenamento ou transporte por diversas razões, entre as quais estão:

- Evitar que os sólidos se depositem no fundo do tanque de armazenamento, o que reduz o rendimento da refinação se o óleo bruto for armazenado por longos períodos sem agitação mecânica.
- Impedir a deposição de sólidos no fundo do recipiente de transporte, reduzindo perdas de óleo.
- Minimizar perdas no processo de refinação.

A degomagem é um processo crucial aplicado ao óleo bruto de soja devido à alta concentração de fosfolipídios em comparação com outros óleos vegetais. Esse processo visa melhorar a estabilidade física e qualidade do óleo, além de facilitar a refinação subsequente. A qualidade do óleo bruto de soja influencia a eficácia da degomagem, com fosfolipídios hidratáveis e não hidratáveis. A formação de fosfolipídios não hidratáveis está relacionada ao teor de umidade das sementes, atividade da fosfolipase D, calor aplicado e ruptura da estrutura celular (GERDE et al., 2020).

Os fosfolipídios presentes no óleo bruto podem ser divididos em duas categorias principais com base em sua remoção: fosfolipídios hidratáveis (HPs) e fosfolipídios não hidratáveis (NHPs). Os HPs podem ser removidos por tratamento com água, que os hidrata e permite sua separação do óleo por centrifugação. Já os NHPs requerem tratamento adicional com ácidos para torná-los solúveis em água, possibilitando sua remoção do óleo por centrifugação. No entanto, as gomas resultantes do tratamento com ácido geralmente têm uma cor escura e não são adequadas para a produção de lecitina, sendo comumente usadas na ração animal ou aplicações industriais (GUPTA, 2017).

Dessa forma, o óleo de soja precisa passar por um processo de purificação para eliminar impurezas, a fim de se tornar adequado para ser consumido diretamente pelas pessoas. (YANG et al., 2008).

O processo de purificação tem como objetivo principal a remoção de impurezas naturalmente presentes nos triacilgliceróis. Os óleos brutos geralmente apresentam dois tipos de impurezas distintos: as insolúveis em óleo, como proteínas, fibras, sujeira e umidade em excesso, e as solúveis em óleo, como ácidos graxos livres, fosfolipídios, glicolipídios, ceras, esteróis, tocoferóis, pigmentos coloridos (como o betacaroteno, clorofilas e gossipol), hidrocarbonetos (como aldeídos e cetonas) e diversos metais em pequenas quantidades (DAYTON; GALHARDO, 2014).

4.1.1. DEGOMAGEM AQUOSA

A degomagem aquosa é um processo essencial na preparação de óleos, originalmente desenvolvido para óleos de soja e canola devido à presença significativa de fosfolipídios. Nesse método convencional, 1% a 3% de água é adicionada ao óleo bruto a altas temperaturas, seguida de centrifugação para remover fosfolipídios. Os fosfolipídios têm caudas hidrofóbicas e cabeças hidrofílicas, o que os leva a formar micelas inversas quando a água é adicionada. A quantidade de água varia, geralmente correspondendo à quantidade inicial de fosfolipídios.

Estudos demonstraram que temperaturas mais altas podem ter um impacto negativo na redução dos fosfolipídios devido à solubilização das gomas hidratadas. A cinética da extração de fosfolipídios varia para diferentes

componentes, com a fosfatidilcolina diminuindo rapidamente, enquanto outros fosfolipídios reduzem de forma mais moderada. Óleos com altos teores de fosfolipídios, como o óleo de soja, podem ser degomados com água, mas podem conter níveis razoáveis de fósforo devido à presença de fosfolipídios não hidratáveis, como sais de ácido fosfático e fosfatidiletanolamina, tornando a degomagem menos eficiente nesses casos (CHEMAT, 2017).

4.1.2. DEGOMAGEM ÁCIDA

A degomagem ácida é um processo eficaz para remover fosfolipídios não hidratáveis (NHPs) de óleos vegetais brutos. Esse método envolve o uso de ácidos, como ácido fosfórico, ácido cítrico, ácido oxálico e ácido tartárico, que quebram complexos de sal/metálico dos NHPs, permitindo a hidratação subsequente com água. A degomagem ácida é especialmente útil em óleos de sementes "fracas" ou que foram danificados por calor ou oxidação (CHEMAT, 2017).

A degomagem ácida é uma alternativa à degomagem com água, resultando em um teor residual de fósforo mais baixo. Normalmente, são escolhidos ácidos de qualidade alimentar, como ácido cítrico, que não aumentam o teor de fósforo no óleo. A dispersão eficiente dos ácidos é crucial para garantir o contato máximo com os complexos de fosfatídeos não hidratáveis (JOHNSON; WHITE; GALLOWAY, 2008).

Existem vários métodos de degomagem ácida, como super-degomagem, degomagem TOP (Totaal Ontsljmings Process), degomagem ORP (Organic Refining Process) e degomagem UF (Ultrafine), que visam atingir um teor de fósforo inferior a 3 ppm, permitindo a refinação física dos óleos. No entanto, as gomas resultantes do processo de degomagem ácida geralmente têm uma cor escura e não são adequadas para uso alimentar (DAYTON; GALHARDO, 2014).

O ácido cítrico demonstrou alta eficiência na redução de fosfolipídios, e o aumento da concentração de ácido melhorou a eficiência da degomagem. Embora ocorram perdas de óleo na degomagem ácida, esse método continua a ser amplamente utilizado devido à sua viabilidade econômica e permite a utilização bem-sucedida do subproduto na forma de gomas (JOHNSON; WHITE; GALLOWAY, 2008).

4.1.3. DEGOMAGEM ENZIMÁTICA

A degomagem enzimática de óleos comestíveis é um método que utiliza principalmente a enzima fosfolipase A1 (PLA1), que é produzida por fermentação microbiana. Esse processo envolve três etapas: ajuste de pH, adição da enzima e separação da goma do óleo. A degomagem mediada por fosfolipase remove fosfolipídios hidratáveis e não hidratáveis, resultando em ácidos lisofosfatidilcolina e ácidos graxos facilmente removidos (O'BRIEN, 2009).

A principal vantagem desse processo é que ele ocorre em condições suaves, evitando altas temperaturas e produtos químicos agressivos. As enzimas são altamente específicas, atuando somente sobre os fosfolipídios, o que preserva outros componentes do óleo. Além disso, o processo requer quantidades pequenas de enzima, reduzindo custos (O'BRIEN, 2009).

No entanto, a degomagem enzimática pode ser dispendiosa devido ao custo da enzima e ao tempo de reação prolongado. Soluções em estudo incluem enzimas recombinantes, enzimas imobilizadas e nanopartículas magnéticas para melhorar a eficiência e a recuperação da enzima. Apesar disso, a degomagem enzimática é promissora, pois não afeta negativamente os componentes essenciais dos óleos em comparação com outras etapas de processamento (CHEMAT, 2017).

Esse método é aplicável a uma ampla variedade de óleos vegetais, com exceção dos óleos de algodão e milho. Ele é particularmente útil para óleos com alto teor de metais, como o óleo de girassol, pois reduz o teor de ferro e cobre. Além disso, a degomagem enzimática tem proporcionado oportunidades para processadores que lidam com óleos brutos de qualidade inferior, como os provenientes de sementes de soja com teores elevados de ácidos graxos livres e fósforo, evitando perdas significativas e produzindo óleos de melhor qualidade (GUPTA, 2017).

4.2. DESACIDIFICAÇÃO

Os ácidos graxos livres que ocorrem naturalmente no óleo provocam acidez, a qual deve ser neutralizada. A neutralização é a operação mais crucial no processo de refino de óleos comestíveis. Esse procedimento de neutralização envolve três etapas distintas, que são a neutralização em si, a lavagem e a secagem (WANG et al., 2021).

A neutralização também é conhecida como desacidificação e refino alcalino ou cáustico. Esse processo é alcançado tratando o óleo de soja com uma solução alcalina aquosa (geralmente hidróxido de sódio) para neutralizar os ácidos graxos livres, seja em um sistema em batelada ou contínuo (GERDE et al., 2020). A reação química envolvida nesse processo é dada pela equação 1.



Além disso, o sabão resultante na reação tem a capacidade de absorver pigmentos naturais, bem como as substâncias gomosas e mucilaginosas que não foram removidas pela degomagem. Para eliminar o sabão formado, utiliza-se a sedimentação natural ou a centrifugação. É importante notar que o óleo de soja bruto pode ser diretamente submetido à neutralização, sem a necessidade de passar pelo processo de degomagem (GERDE et al., 2020).

Os ácidos graxos livres, quando transformados em sal de sódio, juntamente com os triacilgliceróis e fosfolipídios remanescentes, acabam formando o chamado sabão residual. Esse subproduto pode ser submetido a um processo de acidificação novamente, obtendo-se os ácidos graxos que têm utilidade na fabricação de sabão ou na produção de aditivos para rações animais. Além disso, durante a etapa de neutralização, é possível que ocorra uma degradação parcial, bem como a adsorção de pigmentos coloridos, como clorofila e carotenoides, e a ligação de íons metálicos aos fosfolipídios remanescentes. Contudo, é importante observar que tocoferóis podem ser absorvidos pelo sabão residual, e fitoesteróis podem ser transferidos para o sabão residual através de uma partição líquido-líquido durante o processo de neutralização, o que resulta na perda de compostos bioativos no óleo final (CHEW; NYAM, 2020).

Alternativamente, um adsorvente à base de sílica pode ser usado para remover o sabão residual, reduzindo a necessidade de lavagem com água e minimizando o uso de recursos hídricos (GERDE et al., 2020).

Além disso, o refino físico ou refino a vapor é uma técnica usada para reduzir o teor de ácidos graxos livres em óleos, particularmente útil para óleos com alto teor de ácidos graxos livres. A destilação a vapor é aplicada para reduzir as perdas de refino que seriam significativas se o refino cáustico fosse usado (GERDE et al., 2020).

Outras técnicas emergentes incluem a reesterificação, que converte os ácidos graxos livres em glicerídeos neutros a altas temperaturas, e a desacidificação biológica, que usa microrganismos para metabolizar os ácidos graxos livres. No entanto, essas técnicas têm limitações práticas, como alta demanda de energia e dificuldades na separação de microrganismos (CHEW; NYAM, 2020).

4.3. BRANQUEAMENTO

O branqueamento é um processo essencial na refinação de óleos comestíveis, projetado para remover impurezas, incluindo pigmentos que induzem a oxidação, como clorofilas, além de decompor peróxidos resultantes da oxidação em compostos de menor peso molecular. Isso melhora a estabilidade do óleo (GUNSTONE, 2011). Diversos agentes de branqueamento são utilizados, com ênfase na terra de branqueamento ativada por ácido, que é eficaz na adsorção de clorofilas e decomposição de peróxidos. A redução da cor é mais significativa durante o branqueamento, tornando-o crucial na produção de óleo de soja de alta qualidade (GERDE et al., 2020).

A terra de branqueamento, tanto a natural quanto a ativada por ácido, é preferida devido ao seu alto desempenho de adsorção e baixo custo. A temperatura, pressão, tempo e concentração da terra de branqueamento são fatores críticos que afetam o processo. O branqueamento é mais eficiente a temperaturas entre 70-110°C, evitando temperaturas excessivamente altas para evitar a oxidação. O equilíbrio de adsorção se desloca em direção à dessorção a temperaturas mais altas, mas o aumento da temperatura melhora a remoção de cor, indicando reações químicas na superfície da terra de branqueamento (JOHNSON; WHITE; GALLOWAY, 2008).

O processo envolve misturar o óleo com a terra de branqueamento e aquecer a mistura sob vácuo, removendo umidade e impurezas. Após a filtração, o óleo branqueado é obtido. O uso de terras de branqueamento também é eficaz na remoção de sabões residuais, fosfolipídios e produtos de oxidação. A quantidade de terra de branqueamento utilizada varia, geralmente entre 0,3% e 0,6%. O objetivo final do branqueamento é alcançar um óleo com zero peróxido e uma especificação de cor desejada (WANG, 2021).

Além das terras de branqueamento, outros materiais, como sílicas sintéticas, têm sido usados para melhorar o branqueamento. A ultrassonografia também é aplicada para remover pigmentos de cor sem diminuir o uso de adsorventes devido ao calor e à degradação dos pigmentos sono químicos, embora não seja eficaz na remoção de produtos de oxidação (CHEW; NYAM, 2020).

A indústria de processamento de óleo emprega três tipos principais de filtros para remover adsorventes de óleo branqueado. Esses tipos incluem filtros de placas e quadros, filtros de folhas horizontais sob pressão e filtros de folhas verticais sob pressão. Os filtros de placas e quadros, que têm sido amplamente utilizados, consistem em placas e quadros empilhados alternadamente com uma placa de extremidade, criando espaços onde a lama de óleo é filtrada através de um meio de filtro (tecido especial). Nos designs mais antigos, o óleo filtrado era exposto ao oxigênio, levando à oxidação, mas os designs modernos minimizam a exposição (GUPTA, 2017).

Os três passos do processo de filtração são a pré-camada, a filtração e a limpeza. A pré-camada tem a função de proteger as telas do filtro, melhorar a taxa de fluxo, prevenir entupimentos e permitir a remoção eficaz do bolo de filtro. Durante a filtração, a alimentação contínua de corpo é usada para evitar o entupimento dos sólidos suspensos na pré-camada, garantindo um fluxo suave ao redor desses sólidos. Vários indicadores, como queda de pressão, taxa de fluxo ou nível de carga calculado, são usados para determinar quando o espaço do filtro está preenchido com sólidos do óleo branqueado (O'BRIEN, 2009).

Os filtros de placas e quadros foram substituídos em muitos casos por filtros de folhas sob pressão, devido a vantagens como custos de mão-de-obra mais baixos e facilidade de limpeza. A automação completa dessas operações, incluindo filtros fechados autolimpantes totalmente automatizados, tornou-se uma tendência (O'BRIEN, 2009). No entanto, os filtros de placas e quadros modernos operam em ambientes totalmente fechados, minimizando a oxidação do óleo (GUPTA, 2017).

A escolha entre filtros de folhas de pressão verticais e horizontais depende das vantagens e desvantagens de cada design. Os filtros verticais são mais compactos, exigindo menos espaço, mas não permitem a observação do bolo

nas telas sem abrir o filtro. Por outro lado, os filtros horizontais possuem telas do mesmo tamanho e oferecem maior facilidade de inspeção e limpeza, mas requerem mais espaço e têm custos de instalação mais altos (GUPTA, 2017). A Figura 10 apresenta um filtro de folhas de pressão na configuração vertical.

Figura 11 - Filtro de folhas de pressão vertical



Fonte: CEM INTERNATIONAL (s.d.)

4.4. DESODORIZAÇÃO

O óleo após o processo de branqueamento é praticamente isento de impurezas, mas ainda contém pequenas quantidades de substâncias originais que causam odores, bem como os produtos químicos usados durante a etapa de neutralização. O óleo filtrado é encaminhado para o desodorizador, onde é submetido a tratamentos de desacidificação e desodorização. A desodorização tem como foco principal a remoção de compostos responsáveis por odores e sabores indesejados, como ácidos graxos livres residuais (especialmente os de baixo peso molecular), aldeídos, cetonas e álcoois, que podem estar presentes em óleos e gorduras comestíveis brutos, submetidos a degomagem e/ou refinamento alcalino após a etapa de branqueamento (WANG et al., 2021).

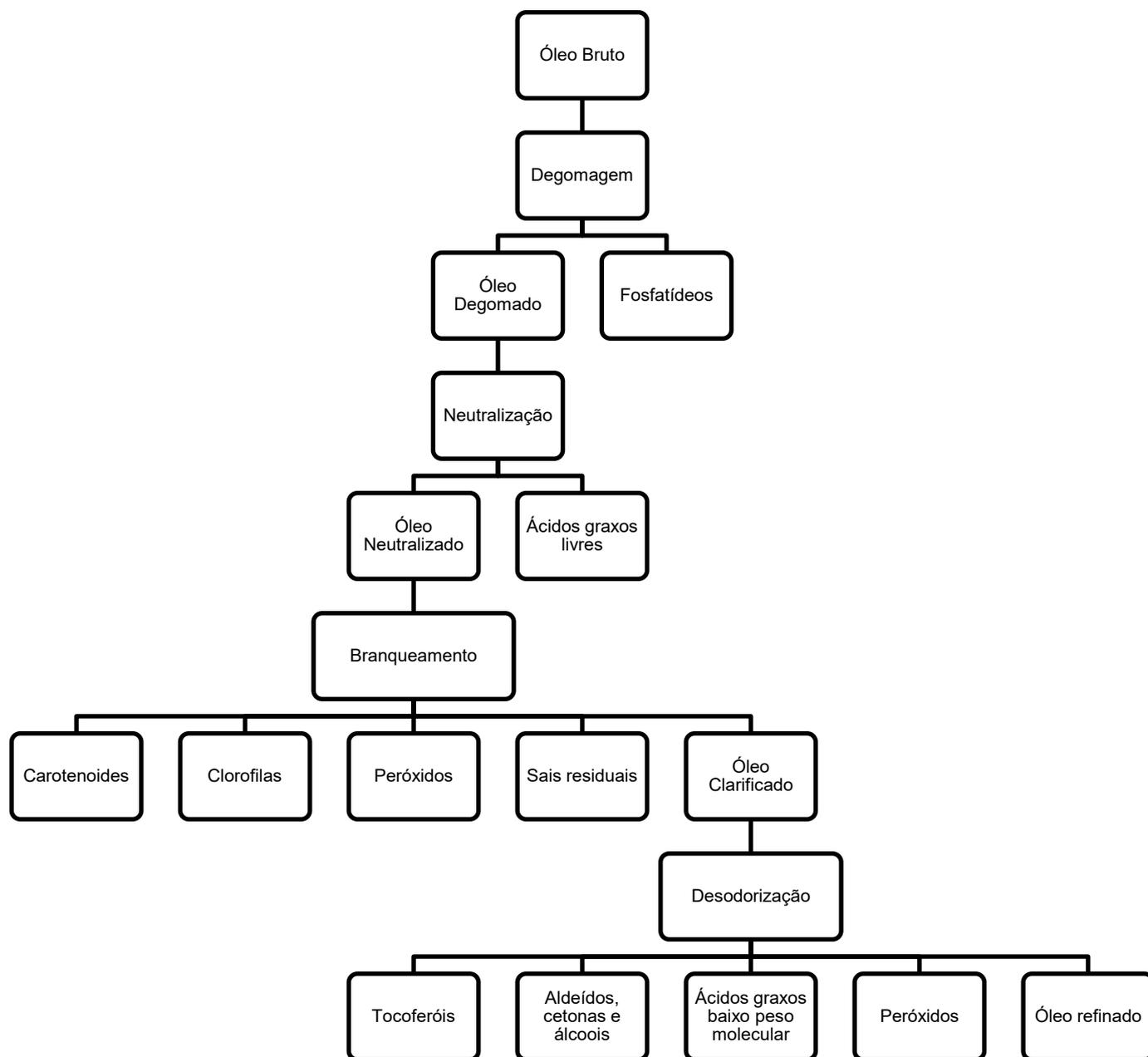
A desodorização pode ser conduzida de várias maneiras (de forma contínua, semi-contínua ou em batelada). A escolha da tecnologia de desodorização mais adequada depende de diversos elementos, como a frequência de troca da matéria-prima, a recuperação de calor desejada e os custos de investimento e operacionais (GREYT, 2020).

A desodorização é essencialmente um processo de destilação a vapor que ocorre em temperaturas elevadas e sob vácuo rigoroso. Para garantir a produção de um produto final de alta qualidade, cada unidade de desodorização deve realizar a desaeração do óleo, aquecê-lo, destilá-lo com vapor e resfriá-lo, tudo isso sem permitir a exposição ao ar (DUDROW, 1983).

Isso gera três efeitos distintos no óleo: (i) eliminação de componentes voláteis, como ácidos graxos livres, compostos de odor, tocoferóis, esteróis e contaminantes como pesticidas e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos leves, entre outros; (ii) efetiva remoção de sabores indesejados; e (iii) efeito da temperatura, que envolve a destruição térmica de pigmentos (conhecido como branqueamento térmico) e reações indesejadas, como a formação de ácidos graxos trans, ésteres de glicidila e ésteres de 3-monocloropropano-1,2-diol, bem como reações de polimerização e conjugação (GREYT, 2020).

A Figura 12 apresenta um fluxograma das etapas que ocorrem no refinamento do óleo bruto e quais componentes são retirados em cada uma dessas etapas.

Figura 12 - Fluxograma das etapas do processo de refinamento de óleo bruto



Fonte: Imagem do autor

5. PRODUTOS DERIVADOS

O óleo de soja bruto contém vários materiais que precisam ser removidos para produzir um óleo refinado neutro, com sabor suave e cor clara. Embora, em alguns momentos, esses materiais possam ter sido considerados resíduos, representando um problema de descarte, na verdade, são valiosos subprodutos quando recuperados e processados eficientemente.

5.1. LECITINA

A lecitina de soja é amplamente utilizada em aplicações farmacêuticas e alimentares devido à sua disponibilidade e funcionalidade. Para melhorar sua funcionalidade, a lecitina bruta de soja é desengordurada, baseando-se na diferença de solubilidade entre lipídios neutros e polares em acetona. A lecitina desengordurada pode ser fracionada, resultando em frações ricas em fosfatidilcolina e fosfatidilinositol, que têm aplicações distintas na indústria alimentícia. A lecitina pode ser produzida a partir de óleo de soja extraído por solvente ou prensado mecanicamente, apresentando diferentes composições de fosfolipídios (GUNSTONE, 2011).

O processo de degomagem é essencial para separar as "gomas" do óleo bruto e produzir lecitina de soja. A operação de degomagem pode ser realizada em refinarias de óleo ou em plantas de extração por solvente. Para obter lecitina de alta qualidade, é importante controlar o teor de umidade durante o processo (VADKE, 2024).

A lecitina de soja é composta principalmente de fosfatidilcolina, cefalina (fosfatidiletanolamina) e fosfatidilinositol, juntamente com outros fosfolipídios em menor quantidade. A composição de ácidos graxos nos fosfolipídios da soja é semelhante à dos triglicerídeos do óleo de soja (ERICKSON, 1995).

Além disso, a lecitina de soja pode passar por modificações químicas, como hidrólise por ácidos, bases ou enzimas, bem como hidroxilação e acetilação, para melhorar suas propriedades emulsificantes, sua dispersão em sistemas aquosos e sua estabilidade ao calor (GERDE et al., 2020).

5.2. DESTILADO DE DESODORIZADOR

O destilado de desodorizador, é um subproduto valioso do processo de destilação a vapor do óleo de soja. Esse destilado contém tocoferóis, esteróis, ácidos graxos livres e outros componentes resultantes da oxidação lipídica, e

sua composição varia de acordo com as condições de processamento e o óleo de soja utilizado como matéria-prima (WOERFEL, 1981).

Os tocoferóis, especialmente o α -tocoferol, e os fitoesteróis emergem como componentes essenciais do destilado de desodorizador de soja devido às suas propriedades antioxidantes. Eles desempenham um papel importante na inibição da ação dos radicais livres. Além disso, os fitoesteróis têm aplicação na redução do colesterol e são usados em alimentos funcionais e nutra cosméticos, contribuindo para a composição dos lipídios da superfície cutânea (GUNSTONE, 2011).

A recuperação eficiente do destilado de desodorizador tornou-se um foco de atenção na indústria. Isso se deve a dois principais motivos: a crescente demanda por tocoferóis e esteróis na indústria farmacêutica, reconhecendo o valor desses compostos para aplicações médicas, e o interesse em melhorar a qualidade do produto final, removendo sabões indesejados do óleo (ERICKSON, 1995).

Há uma tendência de aumento da demanda por tocoferóis de acordo com a Mordor Intelligence (2022). Esse aumento teria uma Taxa de Crescimento Anual Composta de 9,40% até 2028. Uma das justificativas por essa alta demanda é porque a ingestão regular de tocoferol ajuda a reduzir o risco de doenças cardíacas. Além disso, seu consumo também está relacionado a redução de doenças respiratórias e outras doenças. Os dois líderes de mercado para a produção de tocoferóis são a Archer Daniels Midland e a Cargill Inc., o que comprova a importância da captação desse subproduto dentro da produção de óleo de soja.

Com relação aos esteróis, segundo a Mordor Intelligence (2022), a Taxa de Crescimento Anual Composta será de maior do que 6% até 2028. Os esteróis reduzem o colesterol de forma eficaz, além de auxiliarem no tratamento de alguns tipos de câncer. O aumento constante dessas doenças explica a alta demanda esperada para os próximos anos. Entre os 5 líderes de mercado, mais uma vez há a presença de produtores de óleo de soja, com a Cargill Inc. ocupando o segundo lugar e a Archer Daniels Midland em quarto.

Os sistemas de recuperação de destilado são frequentemente integrados nos equipamentos de desodorização e conduzem o vapor do processo através

de um spray recirculante contendo destilado resfriado. Esse procedimento eficazmente condensa o material graxo e direciona o vapor de água para o sistema de ejeção, alcançando eficiências de recuperação na faixa de 85 a 95%, especialmente no caso do óleo de soja. Nesse contexto, colunas de enchimento demonstram ser as mais eficazes (ERICKSON, 1995).

Em períodos de alta demanda e maior valor dos tocoferóis e esteróis, a eliminação do destilado de desodorizador é economicamente vantajosa. No entanto, em períodos de menor demanda, é possível que ele seja vendido como um subproduto de sabão (borra) ou enfrentar desafios relacionados ao descarte. Algumas regulamentações permitem a utilização do destilado como extensor de ração animal, embora isso seja proibido em outros lugares devido à possibilidade de concentração de pesticidas resultante do processo de desodorização (WOERFEL, 1981).

5.3. BORRA DE SABÃO

A produção de óleo de soja gera subprodutos valiosos, como a "borra de sabão" ou "sabão de refino," que surgem durante o processo de refino do óleo. Esses subprodutos são resultado da neutralização alcalina do óleo de soja bruto ou desengordurado (WOERFEL, 1981).

A composição da borra de sabão varia dependendo da qualidade das sementes de soja, das condições de extração e refino do óleo e da eficiência do processo. A borra de sabão contém água, ácidos graxos livres, óleo neutro, fosfolípidios, proteínas e substâncias mucilaginosas (WOERFEL, 1981). Historicamente, a acidulação da borra de sabão tem sido realizada em lotes com a adição de ácido sulfúrico diluído, e a água ácida resultante possui alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e baixo pH, mas pode ser tratada adequadamente para tornar-se facilmente biodegradável (GUNSTONE, 2011).

A borra de sabão bruta contém cerca de 3% de ácidos graxos totais (TFA) e é gerada em cerca de 6% do volume de óleo bruto refinado, o que representa uma quantidade significativa. No entanto, o transporte da borra de sabão bruta é limitado devido ao seu alto teor de água, que aumenta os custos de frete e provoca fermentação rápida (GUNSTONE, 2011).

A maior parte da borra de sabão bruta é geralmente processada nas refinarias, sendo transformada em borra de sabão acidulada (GUNSTONE,

2011). No entanto, a borra de sabão bruta também pode ser usada como ração animal (WOERFEL, 1981).

Além de ser utilizada na produção de ração animal, a borra de sabão acidulada também encontra aplicações na fabricação de sabões e outros produtos industriais, incluindo limpeza, polimento de metais, lubrificação, liberação de moldes, tingimento têxtil, flotação de minérios, produção de biodiesel, fertilizantes e muito mais (GERDE et al., 2020).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo conduzido ofereceu uma análise aprofundada do processo de transformação da soja em um item de significância não apenas nacional, mas global. A complexidade inerente à conversão do grão em óleo foi evidenciada, destacando a importância crucial de seguir diversas etapas interligadas ao trabalho do engenheiro químico, desde a classificação dos grãos até o refinamento.

A versatilidade da soja se revelou notável, possibilitando seu aproveitamento integral. Esta leguminosa é essencial na produção de óleo comestível para consumo humano, além de gerar farelo e pellets de casca de soja para alimentação animal. Paralelamente, a obtenção de subprodutos de valor comercial significativo, como a lecitina, amplamente utilizada na indústria alimentícia como emulsificante, os destilados do desodorizador, essenciais para a indústria farmacêutica, e a borra, que pode ser empregada na produção de biodiesel, graxas e fertilizantes.

É inegável que a cadeia produtiva da soja não apenas atende às demandas alimentares, mas também desempenha um papel vital na economia global, oferecendo uma gama diversificada de produtos com aplicações industriais e comerciais relevantes. Este estudo destaca a importância do processo e a necessidade de um olhar abrangente sobre a cadeia de produção da soja, evidenciando seu impacto em múltiplos setores e seu potencial para impulsionar o desenvolvimento econômico e tecnológico.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. L. RAVAGNANI, M. A. S. S. MODENES, A. N. **Soybean oil extraction in belt extractors with miscella recirculation.** Elsevier, 2010.

BUHLER GROUP. **Cracking mill.** Disponível em: https://www.buhlergroup.com/global/pt/products/cracking_mill.html. Acesso em 06/11/2023.

CEM INTERNATIONAL. **Pressure Leaf Filters.** Disponível em: <https://www.cem-int.com.au/product/pressure-leaf-filters/>. Acesso em: 07/11/2023.

CHEMAT, S. **Edible Oils: Extraction, Processing, and Applications.** CRC Press, 2017.

CHEW, S. C.; NYAM, K. L. **Lipids and Edible Oils: Properties, Processing and Applications.** Academic Press, 2020.

DAYTON, C. L. G.; GALHARDO, F. **Green Vegetable Oil Processing.** AOCS Press, 2014.

DUDROW, F.A. **Deodorization of edible oil.** Journal of the American Oil Chemists' Societ 60, 272–274 ,1983.

ERICKSON, D. R. **Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization.** AOCS Press, 1995.

EUROPA CROWN. **Dessolventizador/Tostador.** Disponível em: https://www.europacrown.com/wp-content/uploads/2018/01/Crown-Desolv-Toaster_A4-PORT-2012_WEB.pdf. Acesso em: 06/11/2023.

GERDE, J. A. et al. **Soybean Oil.** John Wiley & Sons, Ltd, 2020.

GREYT, W. D. **Deodorization.** John Wiley & Sons, Ltd, 2020.

GUNSTONE, F. D. **Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses.** Blackwell Publishing Ltd., 2011.

GUPTA, M. K. **Practical Guide to Vegetable Oil Processing.** AOCS Press, 2017.

JOHNSON, L. A.; WHITE, P. J.; GALLOWAY, R. **Soybeans: Chemistry, Production, Processing and Utilization.** AOCS Press, 2008.

JUNG, M. Y.; YOON, S. H.; MIN, D. B. **Effects of Processing Steps on the Contents of Minor Compounds and Oxidation of Soybean Oil.** Journal of the American Oil Chemists' Societ, 1989.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho do mercado sterols & análise de participação – tendências de crescimento e previsões (2023-2028)**. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/sterols-market>. Acesso em: 08/11/2023.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho do mercado tocoferol & análise de participação – tendências de crescimento e previsões (2023-2028)**. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/tocopherol-market>. Acesso em: 08/11/2023.

O'BRIEN, R. D. **Fats and Oils: Formulating and Processing for Applications**. CRC Press, 2009.

SERRATO, A. G. **Extraction of Oil from Soybeans**. Journal of the American Oil Chemists' Societ, 1981.

SZYCZEWSKI, P. et al. **A comparative study of the content of heavy metals in oils: linseed oil, rapeseed oil and soybean oil in technological production processes**. Polish Academy of Sciences, 2016.

VADKE, V. S. **Principles of Vegetable Oil Extraction**. CRC Press, 2024.

WAKELY ENGINEERING. **High volume roller grinder flaking mill wakely 1260**. Disponível em: <https://wakelyengineering.ie/high-volume-roller-grinder-flaking-mill-wakely-1260/>. Acesso em: 02/11/2023.

WANG, L. K. et al. **Environmental and Natural Resources Engineering**. Springer, 2021.

WOERFEL, J. B. **Processing and Utilization of By-Products from Soil Oil Processing**. Journal of the American Oil Chemists' Societ, 1981.

YANG, B. et al. **Insight into the Enzymatic Degumming Process of Soybean Oil**. Journal of the American Oil Chemists' Societ, 2008.

ZEFERINO, M; RAMOS, S. de F. **Mercado Mundial de Óleos Vegetais: panorama e perspectivas. Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 18, n. 5, p. 1-8, maio 2023. Disponível em: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=16138>. Acesso em: 23/10/2023.