

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA**

CLEISLA PEREIRA FIRMINO

**PRODUÇÃO BIODIESEL DE SEBO BOVINO
COM CATALISADOR HETEROGÊNEO DA CASCA DE OVO**

**ITUMBIARA-GO
2023**



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Cleisla Pereira Firmino

Matrícula: 20201040030210

Título do Trabalho: Produção biossustentável do biodiesel de sebo bovino com catalisador heterogêneo da casca de ovo.

Autorização - Marque uma das opções

1. (☒) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. (☐) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. (☐) Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- (☐) O documento está sujeito a registro de patente.
(☐) O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
(☐) Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 20 / 03 / 2024
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

CLEISLA PEREIRA FIRMINO

**PRODUÇÃO BIODIESEL DE SEBO BOVINO
COM CATALISADOR HETEROGÊNEO DA CASCA DE OVO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Avaliadora do Curso de Licenciatura em Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Licenciado em Química.

Área de Concentração: Química

Orientador(a): Prof(a). Dra. Tatiana Aparecida Rosa da Silva.

ITUMBIARA-GO

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F525p Firmino, Cleisla Pereira

Produção biosustentável do biodiesel de sebo bovino com catalisador heterogêneo da casca de ovo./Cleisla Pereira Firmino.-- Itumbiara, 2023.

58 p. : il. color.

Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura em Química) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2023.

Orientadora: Profa. Dra. Tatiana Aparecida Rosa da Silva.

1. Biocombustíveis. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Investimento em energia limpa. I. Título. II. Silva, Tatiana Aparecida Rosa da Silva. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 665.5

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Eduardo Pereira Resende CRB1/3266

CLEISLA PEREIRA FIRMINO

**PRODUÇÃO BIODIESEL DE SEBO BOVINO
COM CATALISADOR HETEROGÊNEO DA CASCA DE OVO**

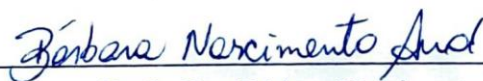
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca examinadora do Curso de Licenciatura em Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a conclusão do Curso de Licenciatura em Química e obtenção do título de licenciada em Química.

Área de concentração: Química Orgânica.

Aprovada em 12 de dezembro de 2023.



Prof. Dra. Tatiana Aparecida Rosa da Silva
Orientadora
IFG – Câmpus Itumbiara



Prof. Dra. Bárbara Nascimento Aud
IFG – Câmpus Itumbiara



Prof. Érica Rost
E. E. Guiomar de Freitas Costa – Uberlândia-MG

ITUMBIARA - GO
2023

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Joana Darc' Pereira Firmino e meu pai, José Antônio Firmino, pelo incentivo de continuar estudando apesar das dificuldades e forças para não desistir. A minha avó, Maria das Graças Pereira e Lucimar Pereira Faustino, pela ajuda na coleta do sebo bovino e cascas de ovo durante a construção do trabalho. A professora Dra. Tatiana Aparecida Rosa da Silva pela orientação e acompanhamento ao longo do curso tanto neste trabalho quanto em vários outros. Ao técnico de laboratório Me. Adilson Correia Goulart pela ajuda com os equipamentos do laboratório quando necessário para a realização dos experimentos. Ao Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, pelas análises realizadas. Ao Instituto Federal de Goiás, por todos esses anos de aprendizado e conhecimento durante o curso e ao Grupo PET Química IFG por estarem comigo durante boa parte desta jornada.

“Às pessoas que olham às estrelas e desejam.
Às estrelas que ouvem e aos sonhos que são
atendidos” (Sarah J. Maas, 2016)

RESUMO

O consumo de combustíveis fósseis vem crescendo de forma desproporcional em razão da intensa demanda energética mundial, reduzindo a qualidade ambiental. Nesse contexto, a busca por alternativas de energia sustentável tornou-se uma necessidade. No Brasil, as principais fontes de energia limpa e renovável são o etanol e o biodiesel. Especificamente para a produção de biodiesel, se faz necessário o uso de um catalisador para acelerar a reação e melhorar a eficiência do processo. Dessa forma, pensando no uso de catalisadores, dentre os catalisadores heterogêneos, aqueles a base de carbonato de cálcio (CaCO_3) ou óxido de cálcio (CaO) se mostram com grande potencial para a reação de transesterificação. Nesse sentido, este trabalho pretende analisar a viabilidade da produção do biodiesel de sebo bovino por meio da transesterificação por via metálica e catálise heterogênea com óxido de cálcio sintetizado a partir da calcinação da casca de ovos de galinha, além de verificar as propriedades físico-químicas do catalisador e do éster produzidos. Dentre os catalisadores heterogêneos, os maiores potenciais na reação de transesterificação estão naqueles à base de CaO ou CaCO_3 , que se transforma em CaO ao ser calcinado. Na metodologia, as cascas dos ovos de galinha, cedidas por uma padaria local foram, primeiramente, secas em estufa a 120°C , trituradas em liquidificador e calcinadas em forno mufla a 850°C por 4h. O catalisador obtido foi caracterizado pelas seguintes análises: Difração de Raios X (DRX); Calorimetria exploratória diferencial e termogravimétrica (DSC/TG); Microscopia eletrônica de varredura (MEV). O biodiesel foi produzido com agitação magnética em sistema de refluxo e banho-maria durante 1 a 4h e em temperatura de 65°C . Para tanto, utilizou-se de 50g de sebo, com as razões estequiométricas de sebo: álcool de 1:12, 1:9, 1:15, 1:20, e quantidade de catalisador de 3%, 8% e 20% em relação a quantidade de sebo. Como resultado, observou-se problemas com os parâmetros analisados para a matéria-prima A, com elevado índice de acidez e densidade. Já a matéria-prima B atendeu aos parâmetros exigidos e o biodiesel teve resultados dentro da legislação exigida conforme a ANP. No catalisador, a análise de DRX apresentou estrutura cristalina semelhante ao CaO , confirmando a conversão pela calcinação. A MEV demonstrou que houve mudança nas estruturas cristalinas da casca do ovo *in natura* em comparação o catalisador. A análise de TG comprovou que temperaturas acima de 800°C podem ser utilizadas para obtenção de catalisadores, pois garantem a produção do CaO em sua forma mais pura. A condição com 8% de catalisador e razão molhar sebo: álcool 1:20 foi a com melhor conversão dos triglicerídeos em ésteres, apesar das dificuldades relacionadas à acidez elevada da matéria-prima. Em conclusão, é possível utilizar cascas de ovos de galinha como alternativa para produzir um catalisador utilizado para produzir biodiesel de sebo bovino através da transesterificação por via metálica. Portanto, utilizar o sebo bovino e a casca do ovo de galinha para a produção do biodiesel retirou do meio ambiente dois resíduos que seriam descartados, comumente, de forma irregular, e utilizou-os para produzir um combustível menos poluente e renovável.

Palavras-chave: Biodiesel; catálise heterogênea; transesterificação; sebo bovino; casca de ovo.

ABSTRACT

The consumption of fossil fuels has been growing disproportionately due to intense global energy demand, reducing environmental quality. In this context, the search for sustainable energy alternatives has become a necessity. In Brazil, the main sources of clean and renewable energy are ethanol and biodiesel. Specifically for the production of biodiesel, it is necessary to use a catalyst to speed up the reaction and improve the efficiency of the process. Therefore, considering the use of catalysts, among heterogeneous catalysts, those based on calcium carbonate (CaCO_3) or calcium oxide (CaO) have great potential for the transesterification reaction. In this sense, this work intends to analyze the feasibility of producing biodiesel from beef tallow through methyl transesterification and heterogeneous catalysis with calcium oxide synthesized from the calcination of chicken eggshells, in addition to verifying the physicochemical properties of the catalyst and ester produced. Among the heterogeneous catalysts, the greatest potential in the transesterification reaction are those based on CaO or CaCO_3 , which transforms into CaO when calcined. In the methodology, chicken egg shells, provided by a local bakery, were first dried in an oven at 120°C , crushed in a blender and calcined in a muffle oven at 850°C for 4h. The obtained catalyst was characterized by the following analyses: X-ray diffraction (XRD); Differential and thermogravimetric scanning calorimetry (DSC/TG); Scanning electron microscopy (SEM). Biodiesel was produced with magnetic stirring in a reflux system and water bath for 1 to 4h at a temperature of 65°C . To do so, 50g of tallow was used, with the stoichiometric ratios of tallow: alcohol of 1:12, 1:9, 1:15, 1:20, and amount of catalyst of 3%, 8% and 20% in relation to the amount of tallow. As a result, problems were observed with the parameters analyzed for raw material A, with a high acidity level and density. Raw material B met the required parameters and biodiesel had results within the legislation required according to the ANP. In the catalyst, XRD analysis showed a crystalline structure similar to CaO , confirming the conversion by calcination. The SEM demonstrated that there was a change in the crystalline structures of the fresh eggshell compared to the catalyst. TG analysis proved that temperatures above 800°C can be used to obtain catalysts, as they guarantee the production of CaO in its purest form. The condition with 8% catalyst and tallow wet: alcohol ratio 1:20 was the one with the best conversion of triglycerides into esters, despite the difficulties related to the high acidity of the raw material. In conclusion, it is possible to use chicken eggshells as an alternative to produce a catalyst used to produce beef tallow biodiesel through methyl transesterification. Therefore, using beef tallow and chicken eggshells to produce biodiesel removed two wastes from the environment that would normally be discarded irregularly, and used them to produce a less polluting and renewable fuel.

Keywords: Biodiesel; heterogeneous catalysis; transesterification; beef tallow; eggshell.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 -	Evolução da Produção de B100 2012 -2021 (m ³).....	12
Figura 02 -	Reação de transesterificação.....	13
Figura 03 -	Matriz energética brasileira em comparação ao resto do mundo.....	16
Figura 04 -	Matriz energética brasileira.....	17
Figura 05 -	Etapas da reação de transesterificação para obtenção de biodiesel.....	20
Figura 06 -	Mecanismo aceito para a reação de transesterificação de triglicerídeos.....	23
Figura 07 -	Estrutura da Casca do Ovo.....	24
Figura 08 -	Reação química de calcinação do carbonato de cálcio (CaCO ₃).....	25
Figura 09 -	Fluxograma da metodologia de produção de ésteres metílicos via transesterificação e catalisador de óxido de cálcio.....	31
Figura 10 -	Aspecto físico das cascas de ovos in natura (a) e após a calcinação a 850 °C por 4h (b).	33
Figura 11-	Difratograma da amostra de casca de ovo calcinada durante 4h (a) e do CaO (b).....	34
Figura 12 -	Curvas TG (a) e DSC (b) da casca do ovo.....	36
Figura 13 -	MEV da casca do ovo in natura ampliada 43x (a); 200x (b); 1000x (c); 2500x (d); 10000x (e) e 20000 (f).....	38
Figura 14 -	Micrografias da casca do ovo calcinada durante 4h ampliada 1400x (a); 2000x (b) e (c); 5000x (e) e 10000x (f).....	39
Figura 15 -	Aspecto físico dos sebos bovinos A e B utilizados na produção do biodiesel.....	40
Figura 16 -	Testes de produção do biodiesel, conforme parâmetros reacionais descritos na Tabela 2, utilizando o sebo A.....	43
Figura 17 -	Testes de produção do biodiesel, conforme parâmetros reacionais descritos na Tabela 2, utilizando o sebo A, após a centrifugação.....	44
Figura 18 -	Teste de produção de biodiesel o sebo B de acordo com os parâmetros da Tabela 2, no teste 8.....	45
Figura 19 -	Teste de produção do biodiesel, conforme parâmetros reacionais descritos na Tabela 2 para o teste 8, utilizando o sebo B, após a centrifugação.....	46
Figura 20 -	Teste de produção do biodiesel, conforme parâmetros reacionais descritos na Tabela 2 para o teste 8, utilizando o sebo B, após a centrifugação.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 -	Composição de ácidos graxos de gorduras animais em comparação com óleo vegetal (% m/m)	19
Tabela 02 -	Parâmetros reacionais utilizados nos testes de produção de biodiesel neste trabalho.....	32
Tabela 03 -	Caracterização físico-química do sebo bovino.....	41
Tabela 04 -	Caracterização físico-química dos biodieseis produzidos com as matérias-primas A e B nos testes 7 e 8, respectivamente.....	47

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABP – Associação Brasileira de Proteína Animal

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

Ca(OH)_2 – Hidróxido de cálcio

$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ – Fosfato de cálcio

CaCO_3 – Carbonato de cálcio

CaO – Óxido de cálcio

CO – Monóxido de carbono

DRX – Difração de Raios X

DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial

GEE – Gases de efeito estufa

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

KOH – Hidróxido de potássio

MEV – Microscopia eletrônica de varredura de alta resolução

MgCO_3 – Carbonato de magnésio

NaOH – Hidróxido de sódio

rpm – Rotações por minuto

SED – detecção de elétrons secundários

SO_2 – Dióxido de enxofre

TG – Análise Termogravimétrica

SUMÁRIO

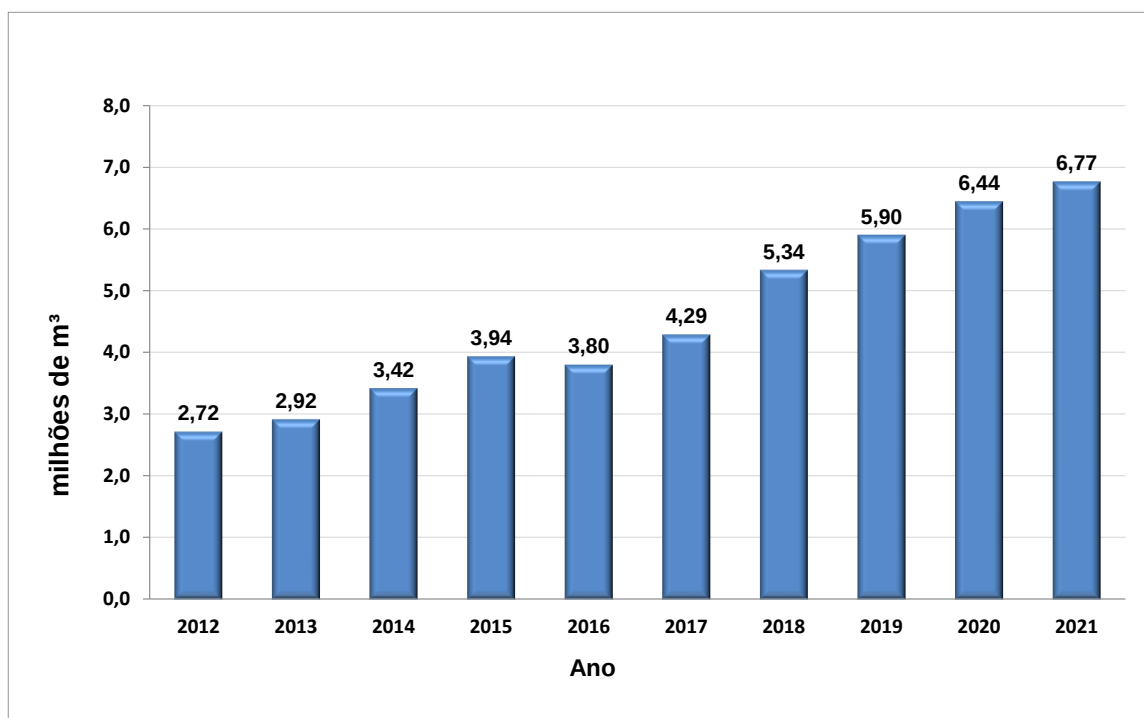
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
1.2 Justificativa	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Matriz energética brasileira	16
2.1 Biodiesel	17
2.2 Sebo bovino como matéria-prima para o Biodiesel	18
2.3 Reação de transesterificação	19
2.4 Catalisadores Heterogêneos	21
2.5 Casca do ovo de galinha	23
2.6 Técnicas de caracterização	25
2.6.1 Difração de Raios X (DRX)	25
2.6.2 Calorimetria Exploratória Diferencial e termogravimétrica (DSC/TG)	26
2.6.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Síntese do catalisador heterogêneo - Óxido de Cálcio (CaO)	28
3.2 Caracterização do catalisador	28
3.2.1 Análise de Difração de Raios X (DRX)	28
3.2.2 Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial e Termogravimétrica (DSC/TG)	29
3.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura	29
3.3 Caracterização do sebo bovino e biodiesel	29
3.3.1 Caracterização do sebo bovino antes e após a reação de transesterificação	29
3.3.2 Índice de acidez	30
3.2.3 Densidade	30
3.3 Reação de Transesterificação	31
3.4 Caracterização do biodiesel	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1 Síntese e caracterização do catalisador	33
4.1.1 Difração de Raios X (DRX)	34
4.1.2 Calorimetria Exploratória Diferencial e Termogravimétrica (DSC/TG)	35
4.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	37
4.2 Síntese do Biodiesel	40
4.2.1 Pré-tratamento e caracterização físico-química do sebo bovino	40
4.2.2 Reação de transesterificação via catálise heterogênea com CaO	42
4.2.3 Caracterização do biodiesel de sebo bovino	47
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

O consumo de combustíveis fósseis vem crescendo de forma desproporcional em razão da intensa demanda energética mundial. O aquecimento global e consumo destes combustíveis reduziram a qualidade ambiental (Pinto, 2021). Nesse contexto, a busca por alternativas de energia sustentável tornou-se uma necessidade. Segundo Araújo e Sobrinho (2023), o setor de biocombustíveis tem um papel fundamental, especialmente no Brasil, um dos principais produtores e consumidores de combustíveis renováveis. O etanol e o biodiesel são as principais fontes de energia limpa e renovável no país. Apesar disso, o setor enfrenta desafios e possibilidades, como a necessidade do aumento da eficiência da produção, reduzir os custos, melhorar a infraestrutura para transporte e armazenamento e a concorrência com os combustíveis fósseis.

O biodiesel pode ser entendido como um combustível renovável que pode ser produzido por meio da transesterificação, processo no qual os triglicerídeos presentes em óleos/gordura animal reagem com um álcool (metanol ou etanol) originando ésteres (biodiesel) e glicerina. O biodiesel obtido pode ser comercializado após adequação à especificação da qualidade. No Brasil, a mistura ao diesel fóssil teve início em 2004, de forma experimental e se tornou voluntária entre 2005 e 2007 no teor de 2%. A Lei nº 11.097/2005 tornou a mistura obrigatória e introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira (Brasil, 2022). A partir de 1º de abril de 2023, a mistura do biodiesel no diesel foi ampliada de 10% para 12%; em 2024, o percentual esperado para a mistura será de 13%, em 2025, chegará a 14% e, em 2026, aos 15% (Brasil, 2023).

No Brasil, o consumo de biodiesel em 2021 chegou à marca de 6,8 bilhões de litros, representando um aumento de 5,1% em comparação ao ano de 2020. Desde 2005, com a criação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), foram produzidos, até 2021, mais de 53,8 bilhões de litros do biocombustível (EPE, 2022). O setor de biodiesel apresentou ainda uma capacidade de produção de 12,4 milhões de m³ de biodiesel (B100), representando um consumo de 33,9 mil m³/dia (ANP, 2022), conforme observado na Figura 01 abaixo.

Figura 01 - Evolução da Produção de B100 2012 -2021 (m³)

Fonte: Adaptado de ANP, 2022.

Em relação às matérias-primas para a produção do biocombustível, se podem citar quaisquer óleos vegetais, gordura animal (como o sebo bovino) e óleo residual de fritura (destes, o óleo de soja é o mais empregado no Brasil). Uma matéria-prima promissora quanto a viabilidade e sustentabilidade econômica é o sebo bovino, que é composto principalmente por: ácidos graxos palmítico (20-37%), o esteárico (25-40%) e o oleico (até 50%). Este material trata-se de um resíduo de frigoríficos, utilizado na produção de ração animal e sabões, entretanto, grande parte ainda é descartado. Seu baixo preço de mercado o torna uma matéria-prima atraente em razão da ampla disponibilidade no Brasil (Almeida *et al.*, 2020). O sebo bovino é proveniente da pecuária e é considerado uma matéria-prima secundária, pois pode ser reinserido na cadeia produtiva para a produção do biodiesel (Freitas; Xavier; Sales, 2016). A cada ano, 1,560 milhão de toneladas de sebo bovino são produzidas no Brasil, sendo que cada quilo de sebo é capaz de gerar até 800 mL de biodiesel (Embrapa, 2021).

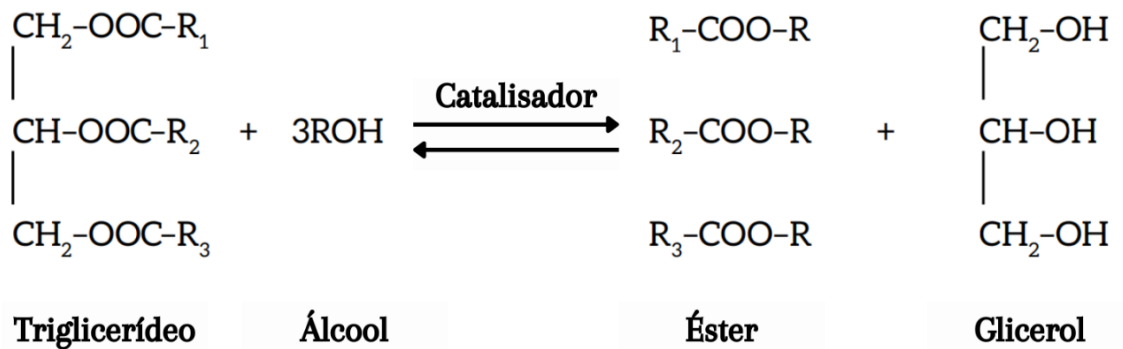
Quando o sebo bovino é descartado incorretamente, é destinado à rede de esgoto, causa inúmeros problemas, dentre eles: formação de películas de gordura, impede a penetração de luz e oxigênio nas águas residuais, o que impossibilita a degradação da matéria orgânica e entupimento das tubulações (Almeida *et al.*, 2020).

A transesterificação, reação observada na Figura 02 é um dos métodos mais utilizados na produção do biodiesel, utilizando um catalisador homogêneo ou heterogêneo, sendo o

primeiro mais utilizado. Esta reação é de caráter reversível, diante disso, recomenda-se manter um excesso de álcool na reação com a finalidade de deslocar o ponto de equilíbrio no sentido dos reagentes, permitindo aumentar o rendimento da reação (Brasil, 2017). A catálise homogênea apresenta algumas desvantagens, como a necessidade de lavagens do biodiesel para eliminar subprodutos, glicerina e o residual do próprio catalisador, além de que não é possível recuperar o catalisador.

Na catálise heterogênea, por outro lado, é possível a recuperação do catalisador e não é necessária a purificação do produto. Dentre os catalisadores heterogêneos, destaca-se o óxido de cálcio (CaO) (Castro, 2017).

Figura 02 – Reação de transesterificação.



Fonte: Adaptado de Brasil, 2017

Uma das fontes de obtenção de óxido de cálcio é a casca do ovo de galinha. A casca de ovo de galinha é rica em carbonato de cálcio (CaCO₃) que pode ser convertido em óxido de cálcio por meio do tratamento térmico (calcinação) (Vieira *et al*, 2017), no qual a casca de ovo é submetida a uma temperatura de cerca de 900° C por 2h. Durante esse processo, gás carbônico é liberado, gerando óxido de cálcio. Conforme a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA), no ano de 2015, no Brasil, cerca de 240 mil toneladas de casca de ovo foram geradas e descartadas em aterros sanitários (Castro; Barañano, 2018).

A partir das informações apresentadas, este trabalho pretende analisar a viabilidade da produção do biodiesel de sebo bovino por meio da transesterificação do sebo bovino com metanol e utilização do catalisador de Óxido de Cálcio sintetizado a partir da calcinação da casca de ovo de galinha, uma vez que é um resíduo que não é reutilizado e tanto este quanto o sebo bovino são encontrados de forma acessível na cidade de Itumbiara e no estado de Goiás.

1.1 Objetivos

Verificar a viabilidade de produção do biodiesel de sebo bovino por meio da transesterificação por via metílica com o uso do catalisador heterogêneo Óxido de Cálcio obtido a partir da calcinação de cascas de ovos de galinha submetidas à calcinação.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Compreender o processo de produção do biodiesel;
- Pesquisar na literatura as condições de reação de transesterificação mais favoráveis com a utilização de catalisadores heterogêneos de óxido de cálcio e sebo bovino;
- Realizar a caracterização físico-química do sebo bovino;
- Sintetizar o catalisador heterogêneo, óxido de cálcio, das cascas de ovos de galinha;
- Caracterizar físico-quimicamente o catalisador obtido;
- Produzir biodiesel pela reação de transesterificação por via metílica usando o catalisador de CaO;
- Analisar propriedades físico-químicas do biodiesel produzido.

1.2 Justificativa

A busca por fontes energéticas renováveis está aumentando exponencialmente a cada ano. O Brasil, conforme a Empresa de Pesquisa Energética (2022), possui sua matriz energética mais renovável em comparação com o resto do mundo, com 46% da energia proveniente de fontes renováveis no ano de 2019, enquanto o resto do mundo apresenta apenas uma média de 14%. No contexto nacional, o etanol e biodiesel são os principais biocombustíveis na matriz energética (Brasil, 2022).

O Brasil apresenta grande potencial para a geração de biodiesel à base de gorduras animais. Estima-se uma produção de 0,8 milhão de toneladas de sebo bovino por ano, sendo 50% destinado à produção de biodiesel, gerando entre 260 e 320 mil litros do biocombustível (Brasil, 2017).

Em um sistema de produção de biodiesel através a transesterificação de óleos por catálise, existem duas maneiras principais: catálise homogênea ou catálise heterogênea. Entretanto, o uso da catálise homogênea tem algumas limitações, como a impossibilidade de

reutilização do catalisador, geração de efluentes e resíduos, dificuldade na recuperação do glicerol, dificuldade na separação e purificação do produto (Saboya, 2012).

Um catalisador heterogêneo, por outro lado, pode ser reutilizado, possui purificação fácil e não apresenta necessidade de lavagem do biodiesel bruto (Pinto, 2021). O uso de catalisadores heterogêneos diminui os custos nos processos de separação e aquisição de novos reagentes para cada reação de conversão (Bueno, 2019). Um exemplo dos catalisadores heterogêneos são aqueles derivados do óxido de cálcio (CaO), que possuem alta atividade e baixo custo de produção. Algumas das fontes de obtenção deste composto são abundantes e renováveis, como a casca de ovo de galinha, concha de molusco e ossos (Cordeiro, 2019).

Diante do apresentado, o trabalho se justifica a partir da possibilidade da minimização do impacto ambiental oriundo da enorme quantidade de cascas de ovos que, por ser um produto residual, é descartada em aterros sanitários e lixões. Conforme Vieira *et al.* (2017), o resíduo da casca de ovo de galinha gera poluição e pode afetar a saúde pública, além dos impactos ambientais.

Vale ressaltar que há grandes questões de importância ligadas aos biocombustíveis, como: sua relevância socioeconômica, relacionada a geração de empregos em toda sua cadeia produtiva, desde o campo até o processamento industrial e a distribuição aos consumidores; vantagens ambientais, fazendo com que o dióxido de carbono (CO₂) produzido durante a queima seja consumido durante o crescimento das lavouras, o caso da utilização de triglicerídeos de fontes vegetais, além de liberar gases menos poluentes do que os produzidos com a queima da gasolina e óleo diesel; confere ao Brasil um potencial de autossuficiência frente aos combustíveis fósseis (Embrapa, 2021). A queima do biodiesel libera óxidos nitrogenados, além de compostos carbonilados, como acetaldeído, formaldeído, acroleína, que são classificados como tóxicos e causadores de carcinomas, além dos Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA), tais como o benzeno que também é tóxico (Lima Filho *et al.*, 2017; Ribas *et al.*, 2016).

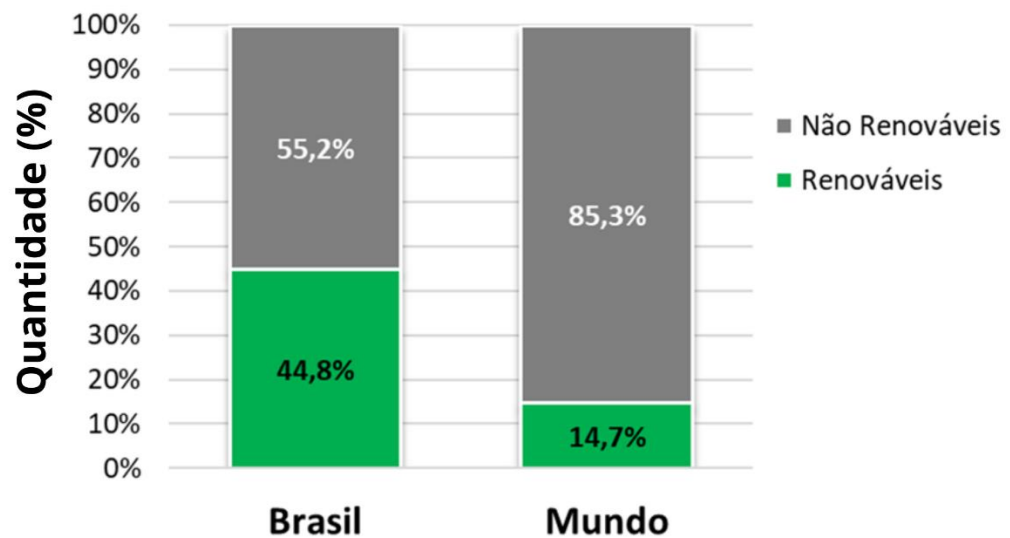
Conforme Bueno (p. 13, 2019), “[...] a emissão de dióxido de enxofre (SO₂) é eliminada, a fuligem diminui 60%, a emissão de monóxido de carbono (CO) e outros hidrocarbonetos diminui em 50%, hidrocarbonetos poliaromáticos reduzem mais que 70% e os gases aromáticos diminuem em 15%”. Assim, este trabalho visa uma produção bio sustentável do biodiesel, reutilizando dois resíduos que causariam um grande impacto socioambiental caso fossem descartados em lixões e aterros sanitários, em uma tentativa de reduzir o impacto ambiental causado pela gordura animal e casca de ovos de galinha no meio ambiente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Matriz energética brasileira

A matriz energética brasileira em 2021 era formada principalmente por energia não renovável, correspondendo a 54% do total. Apesar disso, o índice brasileiro de uso de fontes renováveis (46%) ainda é maior que o do resto do mundo conforme mostrado na Figura 03.

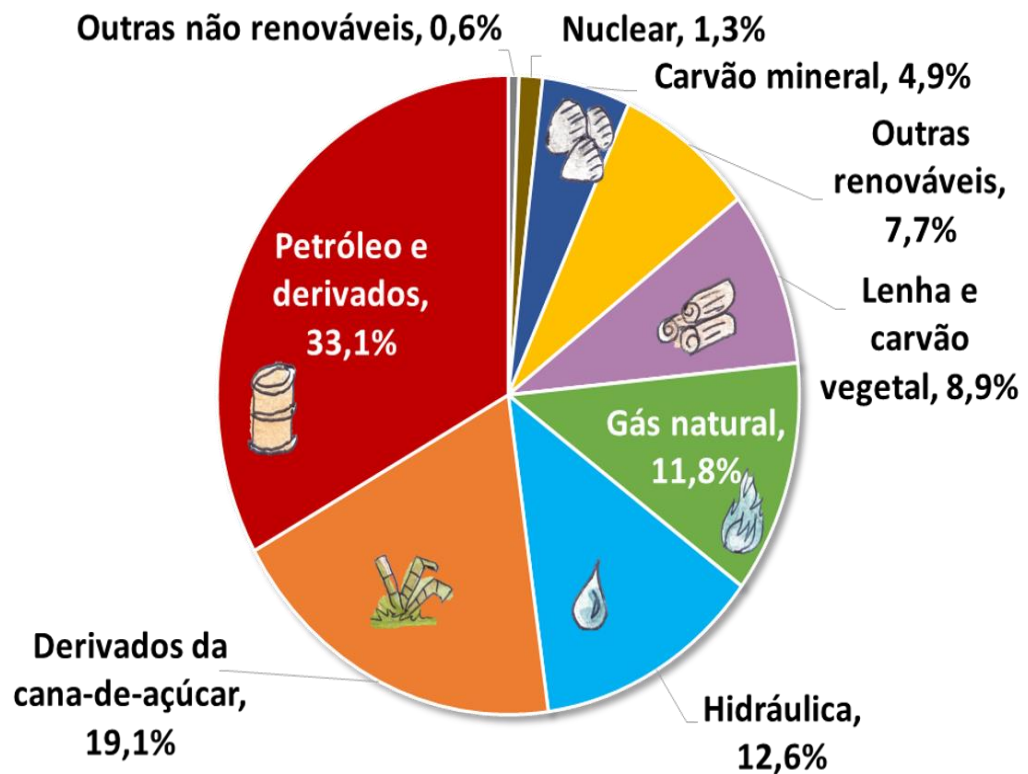
Figura 03 - Matriz energética brasileira em comparação ao resto do mundo.



Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética, 2022.

As fontes não renováveis de energia, como o petróleo e derivados, são grandes emissores dos gases de efeito estufa (GEE). De acordo com a Figura 04, petróleo e derivados, gás natural e carvão mineral correspondem a aproximadamente 50% das fontes de energia utilizadas na matriz energética brasileira (Figura 04) (Empresa de Pesquisa Energética, 2022).

Figura 04 - Matriz energética brasileira.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2022.

Dentre os tipos de fontes renováveis de energia, o Brasil vem investindo fortemente nos biocombustíveis. Conforme a Embrapa (2021), biocombustível pode ser compreendido como qualquer combustível proveniente da biomassa vegetal ou animal, ou seja, quaisquer matéria-prima não mineral, como o etanol (álcool etílico) e o biodiesel.

Os biocombustíveis provenientes da biomassa (cana-de-açúcar, plantas oleaginosas, por exemplo) são capazes de gerar energia com a sua queima. Resíduos orgânicos também são matérias primas para a produção desses combustíveis (Pereira, 2019). O Brasil tem tradição histórica no cultivo e produção da cana-de-açúcar. O país desenvolveu, a partir da década de 70, a produção de etanol como substituto da gasolina a fim de diminuir a dependência do petróleo. O biodiesel, por sua vez, visa eliminar as necessidades do país quanto a importação de óleo diesel (combustível utilizado em veículos pesados e de carga) (Embrapa, 2021).

2.1 Biodiesel

O biodiesel trata-se de “uma mistura de ésteres de ácidos graxos com mono-alcoóis de cadeia curta, como o metanol ou o etanol” (Oliveira; Suarez; Santos, p. 2, 2007). O biocombustível é obtido através dos processos de transesterificação ou esterificação (Oliveira; Suarez; Santos, 2007).

Em razão do alto custo dos óleos vegetais puros, busca-se matérias-primas alternativas para a produção de biodiesel (Silva, 2022). O biodiesel produzido é regulamentado pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) e as determinações das características físico-químicas ficam a cargo da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) (Pereira, 2019).

2.2 Sebo bovino como matéria-prima para o Biodiesel

As gorduras animais também são utilizadas na produção de biodiesel. Dentre estas, o sebo bovino tem sido utilizado para a obtenção de ésteres alquílicos (Cunha, 2008). O sebo bovino é um subproduto da cadeia produtiva da indústria de carnes, muito utilizado pela indústria de sabões, produção de cosméticos, tintas e vernizes, limpeza e higiene, dentre outras. A obtenção deste ocorre mediante o cozimento das vísceras e ossos resultantes do abate do animal, partes não comestíveis ou condenadas, resíduos gordurosos da água de lavagem dos cortes ao longo da linha de processamento. À temperatura ambiente, o sebo bovino apresenta aspecto pastoso, cor esbranquiçada e odor característico (Varão *et al.*, 2017).

Em 2021, no Brasil, houve o abate de 27,54 milhões de bovinos. Apenas no 4º trimestre do ano, foram abatidos 6,90 milhões. O estado do Mato Grosso contribuiu com 16,2% da participação nacional, seguido por Goiás com 10,8% e Mato Grosso do Sul com 10,7% (IBGE, 2022). Cada animal abatido produz, em média, cerca de 15 a 17 quilos de sebo (Biodieselbr, 2014). O principal destino do sebo é na produção de sabões e como suplementação de ração animal. Entretanto, a maior parte deste resíduo é desperdiçado e não possui outra utilização, o que o confere um baixo preço de mercado e o torna uma matéria-prima atraente para a produção do biodiesel, uma vez que é amplamente encontrada no Brasil, que é o maior produtor de carne bovina do mundo (Almeida *et al.*, 2011).

O sebo bovino tem em sua composição ácidos graxos de cadeia saturada, com estruturas químicas similares às dos óleos vegetais (Pereira, 2017), apresentando maior concentração dos ácidos oleico, ácido palmítico e ácido esteárico. Para a conversão dos triglicerídeos do sebo bovino nos ésteres metílicos ou etílicos é necessária uma reação de transesterificação que pode ser catalisada por ácidos ou bases (Medeiros, 2019).

As propriedades químicas da gordura animal e alguns óleos vegetais têm algumas diferenças. Estes óleos vegetais têm grande quantidade de ácidos graxos insaturados, enquanto as gorduras animais têm maiores quantidades de ácidos graxos saturados, como é observado na Tabela 01.

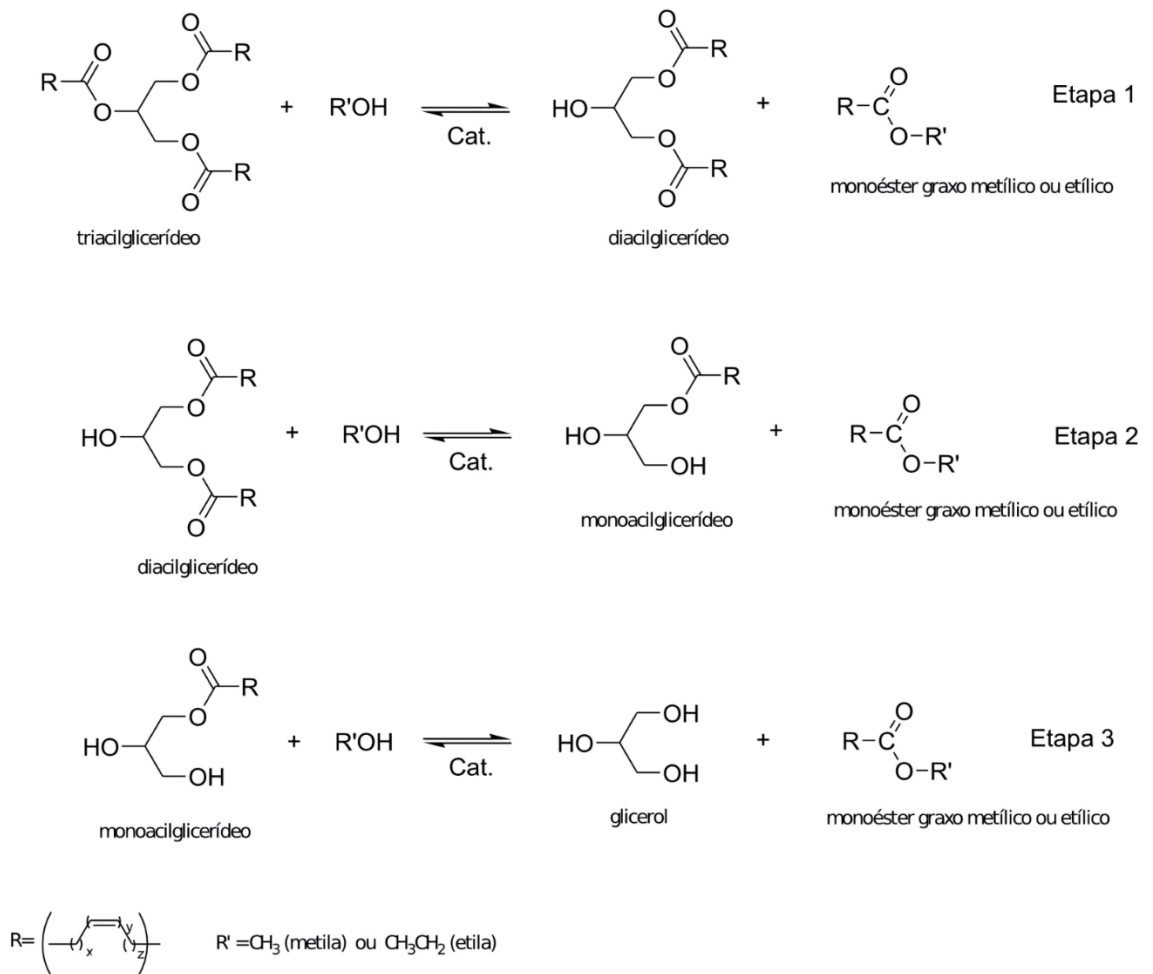
Tabela 01 - Composição de ácidos graxos de gorduras animais em comparação com óleo vegetal (% m/m)

Ácido Graxo	Óleo de Soja	Óleo de Frango	Sebo Bovino
Mirístico (C14:0)	0,4	0,5	3,10
Palmítico (C16:0)	9	26,50	29,10
Esteárico (C18:0)	3 - 5	5,50	18,90
Ácido Oleico (18:1)	18 - 25	43,50	44,0
Ácido Linoleico (18:2)	49 - 57	14,50	0,90
Ácido Linolênico	6 - 11	0,80	—
Araquídico	< 0,5	—	—

Fonte: Cunha, 2008.

2.3 Reação de transesterificação

A reação de transesterificação, ou alcoólise, é o método de produção de biodiesel mais utilizado. Esta consiste em uma reação entre o óleo ou gordura animal e álcool na presença de um catalisador produzindo ésteres (biodiesel) e glicerina. Na transesterificação, há três reações consecutivas e reversíveis, conforme mostrado na Figura 05 (Castro, 2017). Esta reação é composta por duas etapas intermediárias, sendo elas: formação de diglicerídeos a partir dos triglicerídeos e a formação de monoglicerídeos a partir dos diglicerídeos (Lima *et al.*, 2021).

Figura 05 - Etapas da reação de transesterificação para obtenção de biodiesel.

Fonte: Meneghetti; Meneghetti; Brito, 2013.

A razão estequiométrica da reação exige 3 mols de álcool para 1 mol de triglicerídeo (Silva, 2011), porém, é necessário um excesso de álcool para deslocar o equilíbrio da reação no sentido dos produtos, aumentando o rendimento de ésteres (Castro, 2017). Segundo Cunha (p. 15, 2008), “um subproduto da transesterificação é a glicerina, em torno de 25% da mistura total final”. Entretanto, o aumento da razão molar entre álcool e óleo dificulta a separação do glicerol (Silva, 2011).

Dentre os álcoois mais utilizados na obtenção de biodiesel, tem-se empregado bastante o metanol, uma vez que promove rendimentos melhores (Embrapa, 2021). O metanol em excesso permite a formação de uma fase separada de glicerol e deslocar o equilíbrio para um máximo rendimento da reação na formação de biodiesel, visto que álcoois de cadeia curta

conduzem a uma reação com um grau de extensão maior para ésteres alquílicos, além de ter um baixo custo, apresenta menor consumo de energia o que resulta em menor tempo e temperatura exigidos durante o processo (Rossi *et al.*, 2018). A reação de transesterificação por via metílica ocorre em uma temperatura entre 40 e 70° C, ressalta-se ainda que quanto maior a temperatura, menor o tempo de reação. Durante a mesma, a agitação intensa é recomendada para transferir maiores quantidades de massa de triglicerídeos da fase do óleo para interação com o metanol. Ao acrescentar um catalisador ao sebo bovino derretido em um reator, por exemplo, sem agitação nada ocorre, o que sugere a necessidade de agitação para ocorrer a reação de transesterificação (Silva, 2011). Entretanto, uma agitação muito intensa pode colaborar para a formação de sabão, resultando em uma emulsão difícil de separar (Embrapa, 2021).

Em geral, a reação de transesterificação ocorre por meio da catálise básica homogênea empregando hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH) (Cordeiro, 2019), pois estes são mais econômicos (Santos, 2015). Esta é a mais empregada na indústria, em razão do menor tempo de reação e baixo custo. Catalisadores homogêneos básicos são mais empregados para óleos virgens com baixos teores de ácidos graxos livres, pois o contrário resultaria na produção de sabão na reação e ainda dificultaria a separação. Já os catalisadores homogêneos ácidos podem ser aplicados na produção de biodiesel com óleos de alta concentração de ácidos graxos livres (> 6%) e óleos residuais, exigindo, geralmente, condições reacionais severas, altas temperaturas, pressões e excesso de álcool. Os principais catalisadores ácidos são o ácido sulfúrico (H₂SO₄), ácido fosfórico (H₃PO₄) e ácido orgânico sulfônico (Santos, 2015).

Dentre as desvantagens da catálise homogênea, vale ressaltar: impossibilidade de regeneração e reutilização dos catalisadores, a separação entre o catalisador consumido e os produtos (glicerina e biodiesel) é mais difícil e demorada, elevando os custos de produção (Cordeiro, 2019). Para a catálise seguindo uma rota heterogênea, o catalisador empregado se encontra em uma fase diferente da matéria-prima (Lima *et al.*, 2021).

2.4 Catalisadores Heterogêneos

A catálise possui inúmeras aplicações nos processos catalíticos em indústrias químicas e petroquímicas, geração de energia, despoluição de gases e águas e preservação do meio ambiente. Nos processos industriais, utilizam-se catalisadores homogêneos e heterogêneos.

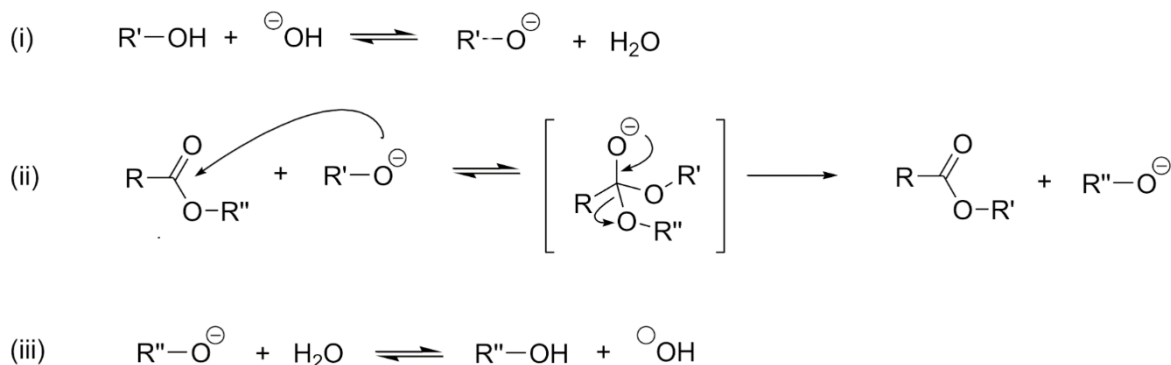
Na catálise heterogênea, o metanol ou etanol no processo de transesterificação, não se mistura com o catalisador sólido. Os catalisadores heterogêneos podem ser subdivididos em: caráter básico e de caráter ácido. No primeiro, encontram-se os óxidos de metais alcalinos, óxidos de metais alcalino-terrosos, óxidos de metais de transição, óxidos de metais mistos, resinas de troca iônica, óxidos a base de carbono, grupo do boro e material residual. Dentre catalisadores heterogêneos básicos mais comuns estão zeólitas, óxidos e sais inorgânicos, hidróxidos duplos lamelares e óxidos estruturados, hidroxissais lamelares e carboxilatos lamelares (Cordeiro, 2019). Segundo Rocha (2021), óxido de cálcio é muito utilizado na produção do biodiesel por causar menos impactos ambientais por apresentar baixa solubilidade em metanol e ter uma alta força básica. Já os catalisadores heterogêneos de caráter ácido, apresentam possibilidade de uso tanto na transesterificação quanto na esterificação. Dentre eles, os ácidos de Brønsted possuem maior atividade em reações de esterificação, já ácidos de Lewis são mais ativos em reações de transesterificação (Bueno, 2019).

O óxido de cálcio trata-se de um sólido branco ou branco acinzentado. Este composto se mostra eficiente em reações de transesterificação em razão de suas características peculiares, como basicidade forte, síntese fácil, vantagens econômicas e disposição em recursos naturais (Pinto, 2021). Além disso, esse catalisador dispõe de uma longa vida útil. O CaO pode ser obtido através da calcita, carapaças de caranguejo, conchas de ostras e caracóis, ossos e cascas de ovos (Castro, 2017).

Pinto (2021) obteve o CaO da casca do ovo para a produção do biodiesel de óleo de algodão, que apresentou um rendimento máximo na transesterificação de 85,83% e até 99,98% com óleo de cártamo. Portanto, o óxido de cálcio é uma alternativa para a produção do biodiesel.

O principal desafio da transesterificação utilizando o CaO como catalisador é a ativação do catalisador, que inclui um processo de calcinação em altas temperaturas. Somado a isso, tem-se também a reação entre o catalisador e glicerol, originando subprodutos como o digliceróxido de cálcio. A reação é mais lenta em comparação com catalisadores básicos homogêneos (Pinto, 2021), o que demanda um tempo maior de reação para obtenção de biodiesel. Para a reação de transesterificação com a presença de bases de Brønsted, o mecanismo amplamente aceito é observado na Figura 06 abaixo.

Figura 06 – Mecanismo aceito para a reação de transesterificação de triglicerídeos.



Fonte: Adaptado de Meneghetti; Meneghetti; Brito, 2013.

Segundo Meneghetti; Meneghetti; Brito (p. 69, 2013):

Inicialmente é formada a espécie ativa (alcóxido) pela reação do álcool com a base, veja reação (i). Após, as carbonilas dos acilglicerídeos sofrem gradualmente ataque nucleofílico do alcóxido produzido anteriormente, formando intermediários tetraédricos, veja reação (ii). A partir de um rearranjo destes intermediários, há a formação de um éster e outro alcóxido, o qual, após a desprotonação do ácido conjugado da base, formado na reação (i), regenera a base de partida. Esse mecanismo ocorre sucessivamente, até que praticamente todos os tri-, di- e monoacilglicerídeos sejam transformados em ésteres alquílicos e glicerol.

2.5 Casca do ovo de galinha

O ovo é um dos alimentos mais completos na alimentação humana e amplamente consumido mundialmente, com alto valor biológico em sua composição nutricional. Os maiores consumidores de ovos são o México, Japão, Paraguai e China, ultrapassando 300 ovos por ano. A produção de ovos no Brasil, segundo a ABPA foi superior a 53 bilhões de unidades no ano de 2020 (Brito, *et al.*, 2021).

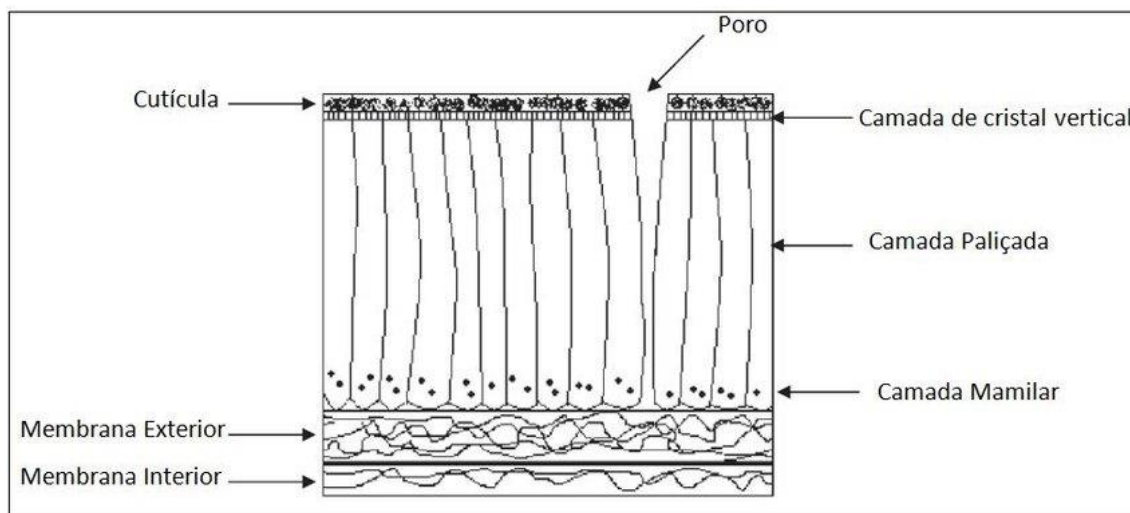
Em 2019, o consumo *per capita* de ovos no Brasil foi de 230 unidades. O crescente consumo de ovos pela população resulta no aumento do número de casca de ovos desprezadas. Aproximadamente 6 milhões de toneladas são descartadas nas empresas alimentícias e residências em todo mundo, o que gera um enorme impacto econômico, social e ambiental (Pandolfi *et al.*, 2022). A casca do ovo é um subproduto da indústria de processamento de ovos pouco valorizado com elevado potencial econômico. Dar uma destinação adequada a este resíduo é muito importante, em razão da poluição ambiental e risco para a saúde pública que o mesmo pode gerar. Entretanto, implica em um custo elevado para a indústria. Por ser um resíduo, a casca de ovo não tem custos de aquisição. Dentre os catalisadores heterogêneos, os

maiores potenciais na reação de transesterificação estão naqueles à base de CaO ou CaCO_3 que se transforma em CaO ao ser calcinado (Rocha, 2021).

Cascas de ovos de galinha contém elevado teor de cálcio (Vilar; Sabaa-Srur; Marques, 2010), sendo compostas por: carbonato de cálcio (CaCO_3), na forma de calcita - 94% em massa, fosfato de cálcio ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) (1% em massa), carbonato de magnésio (MgCO_3) (1% em massa), matéria orgânica (4% em massa) e água. Esta trata-se de uma biocerâmica natural e porosa, formada a partir da deposição sequencial de diferentes camadas em torno da albumina que se passa no istmo e no útero da galinha (Vieira *et al.*, 2017). Segundo Alencar *et al.*, (p. 3, 2022), “O resíduo proveniente da casca do ovo é uma matéria-prima natural, abundante, não tóxica e apresenta elevado potencial econômico”. Por ser rico em CaCO_3 , este material vem sendo estudado como fonte alternativa de obtenção de carbonato, que normalmente é proveniente da exploração de roxas calcárias (Alencar *et al.*, 2022).

A casca do ovo possui uma estrutura policristalina perfeitamente ordenada, formada por uma camada esponjosa, camada de cutícula, uma camada de calcita ou carbonato de cálcio e duas membranas, além de 7000-17000 canais de poros em forma de funil em sua superfície para a troca de água e gases, conforme mostrado na Figura 07 (Vieira *et al.*, 2017).

Figura 07 – Estrutura da Casca do Ovo.



Fonte: Vieira *et al.*, 2017.

Recentemente, trabalhos tem mostrado que a casca de ovo, por ser rica em CaCO_3 , pode ser utilizada como catalisador nas reações visando a produção de biodiesel (Castro, Barañano, 2017). Por ser um resíduo, a casca de ovo não tem custos de aquisição. O uso deste material

como catalisador minimiza o impacto ambiental causado por sua disposição em aterros sanitários e o uso de reservas naturais de rocha calcária, fonte natural de carbonato de cálcio não renovável. Além de ser um catalisador de baixo custo que minimiza o custo final do processo de produção (Castro, Barañano, 2017). O carbonato de cálcio, um dos principais componentes da casca do ovo, pode ser convertido em óxido de cálcio a uma dada temperatura por um determinado período, através do processo de calcinação, liberando uma molécula de dióxido de carbono, como é observado na Figura 08 (Alencar *et al.*, 2022).

Figura 08 – Reação química de calcinação do carbonato de cálcio (CaCO₃).



Fonte: Autor (2024).

A etapa de calcinação, o tempo e a temperatura são fatores determinantes para a formação completa de CaO, uma vez que o tempo curto ou baixa temperatura levam a formação incompleta da fase ativa de CaO (Alencar *et al.*, 2022).

2.6 Técnicas de caracterização

2.6.1 Difração de Raios X (DRX)

A difração de raios X é uma técnica comum para o estudo de estruturas cristalinas e espaçamento atômico em inúmeros materiais, baseando-se na interferência construtiva entre os raios X monocromáticos e a amostra (Silva, 2020). Os instrumentos de medidas de DRX são difratômetros com análises de amostras em pó ou com câmaras de monocristais acopladas. O arranjo geométrico destes equipamentos trata-se de um tubo de raios X, um goniômetro horizontal ou vertical e um detector de raios X. A técnica de DRX usada para a caracterização de fases é amplamente vantajosa, pois os resultados são apresentados com rapidez e simplicidade do método, além da confiabilidade dos resultados obtidos, já que cada fase cristalina tem um perfil de difração específico. Ainda é possível analisar materiais com uma

mistura de fases e determinar quantitativamente estas, além de não usar reagentes químicos na análise e preparo das amostras (Seibel; Kato; Lima, 2022).

2.6.2 Calorimetria Exploratória Diferencial e termogravimétrica (DSC/TG)

A análise termogravimétrica é entendida como uma “[...] técnica termoanalítica que acompanha a variação da massa da amostra, em função da programação de temperatura” (Denari; Cavaleiro, p. 4, 2012). Os métodos termogravimétricos são classificados como: dinâmico (perda de massa registrada continuamente com o aumento da temperatura a uma razão constante ou linear); isotérmico (variação de massa registrada em função do tempo com a temperatura constante); e quase-isotérmico (a temperatura é mantida constante quando a amostra começa a perder massa, até que a massa se estabilize e então a temperatura é aumentada novamente) (Pereira, 2013).

Segundo Pereira (p. 31, 2013), “Nas curvas de TG, a perda de massa (expressa no eixo vertical em percentagem) é caracterizada por duas temperaturas (no eixo horizontal) T_i e T_f .”. A diferença entre a temperatura final e inicial ($T_f - T_i$) é o intervalo da reação, sendo a temperatura inicial aquela em que a variação de massa atinge o valor que a termobalança é capaz de detectar e a final é a temperatura quando a massa atinge o seu máximo de degradação.

A calorimetria exploratória diferencial pode ser definida como uma técnica em que ocorre monitoramento das variações de entalpia da amostra em relação a um material termicamente inerte, com ambos submetidos a uma programação controlada de temperatura (Denari; Cavaleiro, 2012). Esta técnica mede, em função da temperatura ou tempo, a temperatura e fluxo de calor da amostra. Esta é colocada exposta a mudanças de temperatura junto ao material inerte, para a medição da diferença de energia entre eles (Garcian, 2022).

2.6.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A maioria dos materiais possui, em sua microestrutura, poros internos, microfissuras, microporos e poros, que variam bastante em relação ao seu tamanho, estrutura, acessibilidade e porosidade interna. Esses e outros detalhes da porosidade superficial e interna podem ser obtidos através de Microscopia ótica e/ou Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), em que é possível obter o tamanho dos poros através da análise das imagens. São utilizadas ainda outras técnicas para adicionar mais informações aos resultados, como porosimetria de mercúrio,

adsorção física, adsorção química, dentre outras. De modo geral, a determinação da área superficial através de técnicas de microscopia tem sido amplamente utilizada (Reis, 2013). O MEV é capaz de fornecer informações qualitativas e quantitativas da composição da amostra na região submicrométrica de incidência do feixe de elétrons, facilitando a identificação de precipitados e variações da composição química dentro de um grão (Machado, 2010).

A principal função de um microscópio é visualizar aquilo que é invisível ao olho humano ou que for pequeno demais para tal. Microscópios óticos convencionais se limitam a um aumento de 2000 vezes. O MEV utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons (utilizados em um microscópio óptico convencional), permitindo solucionar o problema de resolução das imagens. O MEV pode fornecer em pouco tempo informações a respeito da morfologia e identificação de elementos químicos de amostras sólidas, sendo de comum utilização na biologia, odontologia, farmácia, química, física, dentre outros. Um microscópio eletrônico de varredura permite observar as características microestruturais de objetos sólidos, informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de amostras sólidas. O princípio de funcionamento da MEV consiste em “utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente” (Dedavid; Gomes; Machado, p. 11, 2007). A técnica é amplamente utilizada para realizar análises morfológicas de superfícies de particulados, polímeros, proteínas, sementes, compostos inorgânicos e orgânicos, possibilitando analisar a superfície fraturada (análise de falhas), avaliando ainda o tamanho de partículas, estrutura e forma (Costa, 2016).

Esta análise apresenta uma imagem tridimensional das amostras, permitindo a análise em pequenos aumentos e grande profundidade de foco. A técnica foi utilizada, por exemplo, para a caracterização morfológica do pó de ostra *in natura* e calcinado no trabalho de Borges *et al.* (2023), em ampliações de 100 a 5000x.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo tratou-se da viabilidade da síntese do biodiesel através da transesterificação por via metílica utilizando como matéria prima o sebo bovino, gordura de fácil acesso na região de Itumbiara (GO), e óxido de cálcio extraído de cascas de ovos de galinha. Para isso, adotou-se uma pesquisa experimental, que é entendida como uma pesquisa capaz de “determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto” (Gil, p. 47, 2002).

3.1 Síntese do catalisador heterogêneo - Óxido de Cálcio (CaO)

As cascas de ovos de galinha foram cedidas por uma padaria local da cidade de Itumbiara (Goiás). Estas foram higienizadas em água corrente e submetidas à secagem em estufa de esterilização e secagem digital da marca *SolidSteel* a 120 °C durante 3 horas. Posteriormente, foram trituradas em um liquidificador industrial e no gral até obter a granulometria de um pó. O pó obtido das cascas dos ovos foi levado ao forno mufla, da marca *GP Científica*, para realização do tratamento térmico (calcinação) a temperatura de 850°C durante 4h (Vieira, *et al.*, 2017). A temperatura escolhida deve-se aos resultados da caracterização do catalisador, em que temperaturas acima de 800 °C são capazes de converter CaCO_3 a CaO através da calcinação.

Após o tempo decorrido, desligou-se a mufla aguardou-se o seu completo resfriamento para retirar a amostra em segurança. A amostra foi então retirada e armazenada em um béquer, mantidas em um dessecador até a realização dos experimentos a fim de evitar absorção de umidade (Pinto, 2021).

3.2 Caracterização do catalisador

Os materiais produzidos foram caracterizados por DRX, DSC/TG e MEV no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, na cidade de Goiânia (GO).

3.2.1 Análise de Difração de Raios X (DRX)

O método empregado utilizou-se de uma alíquota da amostra montada em um porta de

amostras do tipo *backload*. Em seguida, a amostra foi levada ao equipamento para a coleta do difratograma. As medidas de DRX foram realizadas em um difratômetro *Bruker D8 Discover*, utilizando radiação monocromática de um tipo com anodo de cobre acoplado a um monocromador Johansson para $K\alpha_1$ operando em 40kV e 40mA, configuração *BraggBrentano* -2, detector unidimensional Lynxeye, intervalo de 2θ de 10° a 90°, com passo de 0,01°. As amostras foram mantidas em rotação de 15 rpm durante a medida.

3.2.2 Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial e Termogravimétrica (DSC/TG)

As análises utilizaram o equipamento *Netzsch STA 449 F3 Nevio* com um intervalo de temperatura de 35-900 °C, taxa de aquecimento 20 K/min em cadinho alumina 85µL, Aberto e fluxo de gás nitrogênio (100 mL/min).

3.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para análise das características microestruturais das amostras, as mesmas foram coberta, as amostras foram cobertas de carbono e com ouro para a aquisição das micrografias. As imagens foram obtidas em um microscópio eletrônico de varredura por emissão de campo (MEV-FEG) *Jeol JSM7100F* com tensão de aceleração de elétrons de 7 KV no modo de detecção de elétrons secundários (SED).

3.3 Caracterização do sebo bovino e biodiesel

3.3.1 Caracterização do sebo bovino antes e após a reação de transesterificação

O sebo foi limpo e cortado em pedaços menores. A extração deste foi feita através da fritura em fogo baixo a temperatura aproximada de 46 °C, pois sua temperatura de fusão é entre 45-48 °C, até o total derretimento do sebo. Em seguida, o sebo foi filtrado para retirar as impurezas e armazenado em garrafas PET. Em seguida, foram realizadas as análises de índice de acidez e densidade (Rost, 2022). Foram utilizadas duas matérias-primas (A e B). O sebo intitulado matéria-prima A ficou armazenado durante cerca de um mês antes das análises e reações, enquanto a matéria-prima B foi testada no dia seguinte a sua coleta.

3.3.2 Índice de acidez

O índice de acidez refere-se ao número de mg de KOH necessário para neutralizar os ácidos graxos livres em 1g da amostra. A acidez aumenta com o aumento da deterioração da amostra (Osawa; Gonçalves, 2006),

O índice de acidez foi calculado a partir da pesagem de 2 g da amostra em um Erlenmeyer de 125 mL. Neste, foi adicionado 25 mL de éter-álcool neutro e 2 gotas de fenolftaleína para realizar a titulação com hidróxido de sódio 0,1 M. Para a obtenção do índice de acidez (Dalcolle, *et al*, 2013), utilizou-se a Equação 1:

$$I_A = \frac{(V_{NaOH} * FC_{NaOH} * MM_{KOH} * N_{NaOH})}{m} \quad (1)$$

Em que:

V = Volume em mL gasto da solução de NaOH na titulação

N = Concentração normal da solução de NaOH

FC = Fator de correção da solução de NaOH

m = Massa em gramas da amostra utilizada

MM = Massa molar do KOH

3.2.3 Densidade

A análise da densidade, ou massa específica, foi realizada por gravimetria. A matéria-prima foi colocada até o menisco de 20 mL da proveta e pesado em uma balança. A densidade da amostra foi obtida a partir da razão entre a massa obtida pelo volume calibrado de 20 mL de uma proveta volumétrica (Rost, 2022), conforme a equação 2:

$$densidade = \frac{m}{v} \quad (2)$$

Em que:

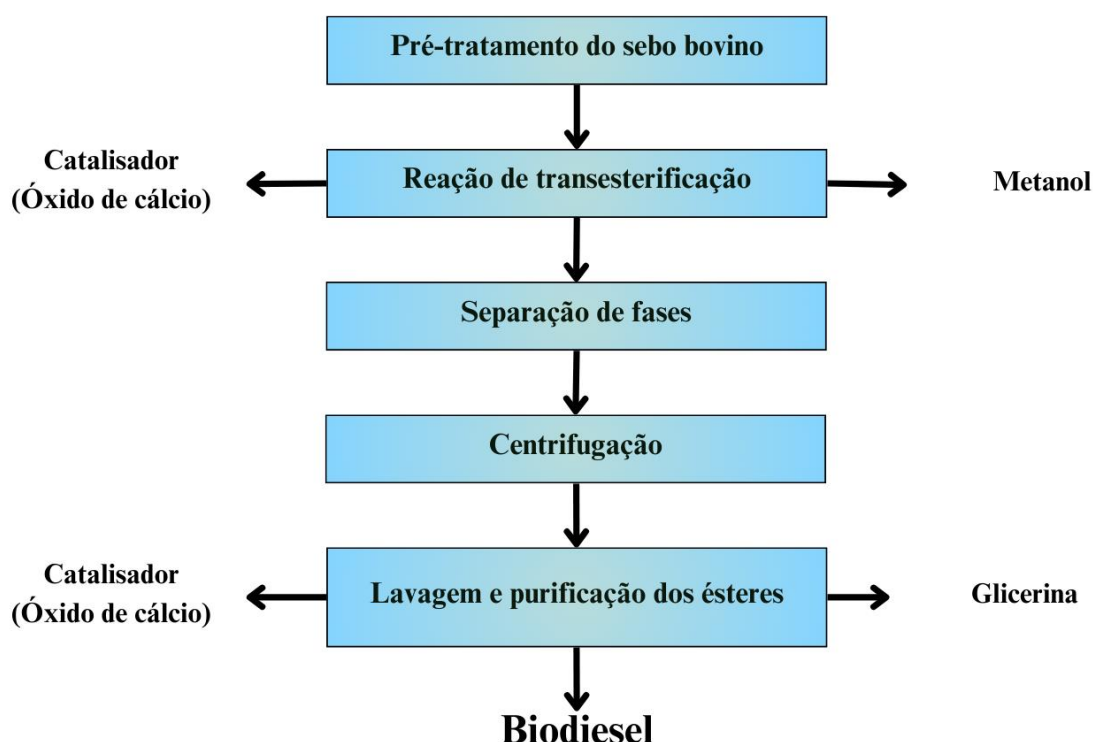
m = Massa em gramas da amostra

v = volume em mL da amostra

3.3 Reação de Transesterificação

O fluxograma mostrado na Figura 09 abaixo ilustra o processo de transesterificação utilizado neste trabalho.

Figura 09 - Fluxograma da metodologia de produção de ésteres metílicos via transesterificação e catalisador de óxido de cálcio.



Fonte: Autor, 2023

O biodiesel foi sintetizado a partir da transesterificação por via metílica com catálise heterogênea com o óxido de cálcio, sob refluxo, evitando perdas, com agitação magnética e temperatura do meio reacional de 65°C. Para a reação, utilizou-se o catalisador com metanol e com as razões estequiométricas de gordura: metanol de 1:12, 1:9, 1:15, 1:20, com variação no tempo reacional entre 1h e 4h. A quantidade de catalisador também foi variada em função da massa de sebo, a fim de determinar as melhores condições de reação, como observado na Tabela 02. Pesou-se o óxido de cálcio e este foi adicionado a um Erlenmeyer de 250 mL com metanol. O Erlenmeyer foi devidamente tampado e a mistura foi mantida sob agitação em um agitador magnético por 1,5h (Castro, 2017). Em seguida, a mistura foi adicionada ao balão de fundo

chato contendo o sebo bovino e este ao sistema de refluxo sob agitação constante durante as condições reacionais na Tabela 02. Os testes foram realizados com base em pesquisas realizadas para testar diferentes condições reacionais para comparar quais as melhores condições de conversão de sebo a biodiesel.

Tabela 02 - Parâmetros reacionais utilizados nos testes de produção de biodiesel neste trabalho.

Teste	Matéria-prima (Sebo)	Razão molar gordura: metanol	Concentração do catalisador (%) em relação a massa de sebo	Tempo reacional (h)
1	A	1:12	20	1
2	A	1:12	8	3
3	A	1:9	3	1,5
4	A	1:20	8	4
5	A	1:20	3	3
6	A	1:15	3	4
7	A	1:15	3	3
8	B	1:20	8	3

Fonte: Autor, 2023.

O sistema utilizado na reação consistiu em um refluxo com banho maria sob agitação magnética e temperatura controlada em 65 °C.

Ao final de cada reação, a mistura foi transferida para um funil de bromo para decantação das fases constituídas principalmente de biodiesel e glicerina. Posteriormente, as amostras foram centrifugadas por 2 min. à 3400 rpm para promover a total separação dos componentes por meio da sedimentação centrifugal, separando assim o biodiesel, metanol, resíduos de catalisador remanescentes e glicerina. As amostras então voltaram para o funil de bromo e removeu-se a fase inferior do funil de decantação. Conforme o trabalho de Silva (2011), realizou-se 6 lavagens com água destilada quente, a uma temperatura aproximada de 60 °C, do produto obtido para retirar os resíduos, subprodutos e excedentes de álcool ou catalisador. A água de lavagem foi retirada e armazenada em um frasco e, em um béquer, o biodiesel foi recolhido e levado a uma estufa para o processo de secagem a 80 °C por 2 h. O produto foi pesado e armazenado para posterior análise.

3.4 Caracterização do biodiesel

O biodiesel produzido foi caracterizado por Índice de Acidez e Densidade, conforme procedimentos descritos nos itens 3.3.2 e 3.3.3.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Síntese e caracterização do catalisador

A casca do ovo *in natura* apresentou coloração ligeiramente esbranquiçada e após a calcinação observou-se uma coloração branca, com aspecto de pó, especialmente na amostra calcinada após 4 h, conforme observado na Figura 10. A coloração é um indicativo que a reação de decomposição de CaCO_3 em CaO foi completa na amostra a temperatura de 850 °C. Na Figura 10 é apresentado à esquerda o aspecto inicial da matéria-prima antes da calcinação e à direita o material obtido após a calcinação da amostra durante 4h a 850 °C.

Figura 10 – Aspecto físico das cascas de ovos *in natura* (a) e após a calcinação a 850 °C por 4h (b).



Fonte: Autor, 2023.

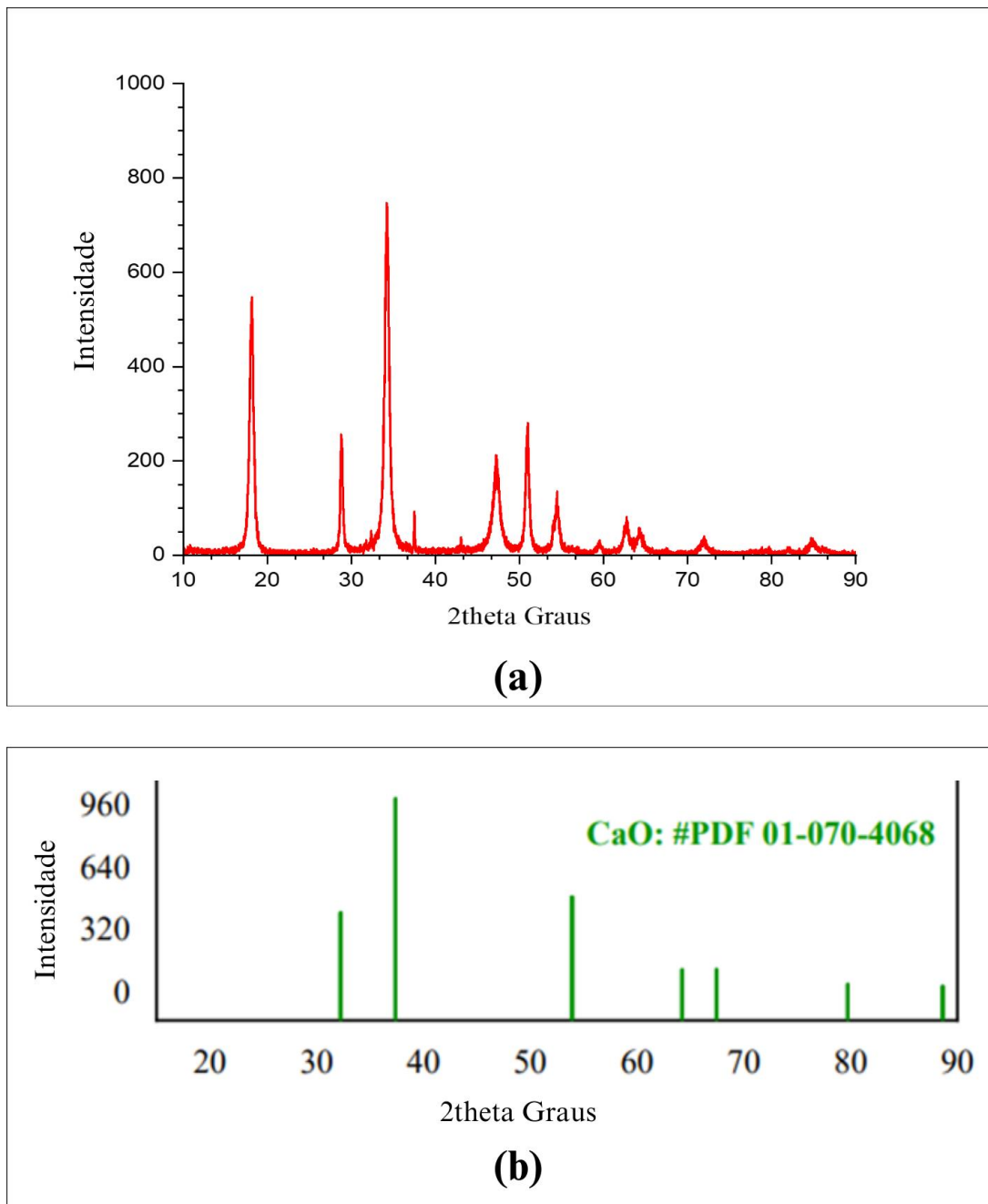
O trabalho de Castro (2017, p. 29) afirma que o “tempo curto e a baixa temperatura causa a formação incompleta da fase ativa do CaO , enquanto o longo tempo e a alta temperatura provocam a sinterização das partículas do catalisador”.

O processo de calcinação ocorre em fornos que trabalham em altas temperaturas e visa descarbonatar, ou seja, extrair o dióxido de carbono agrupado com os óxidos de cálcio ou magnésio (Rosa, 2019).

4.1.1 Difração de Raios X (DRX)

A Figura 11 mostra os difratogramas do catalisador obtido. Observou-se que para ambos os tempos de calcinação houve a formação do CaO, obtendo a fase única de CaO.

Figura 11 - Difratograma da amostra de casca de ovo calcinada durante 4h (a) e do CaO (b).



Fonte: Autor, 2023 (a); Adaptado de Pinto (2021) (b).

A amostra de catalisador exibiu picos semelhantes ao difratograma do CaO, mostrado na Figura 12.b), cujo pico principal está entre $2\theta = 30$ e 40° , representando picos característicos

de CaO de fase cúbica. Observa-se que os picos da amostra de catalisador são equivalentes aos de óxido de cálcio encontrado no trabalho de Pinto (2021). O DRX possibilitou obter informações sobre as fases cristalinas presentes na amostra.

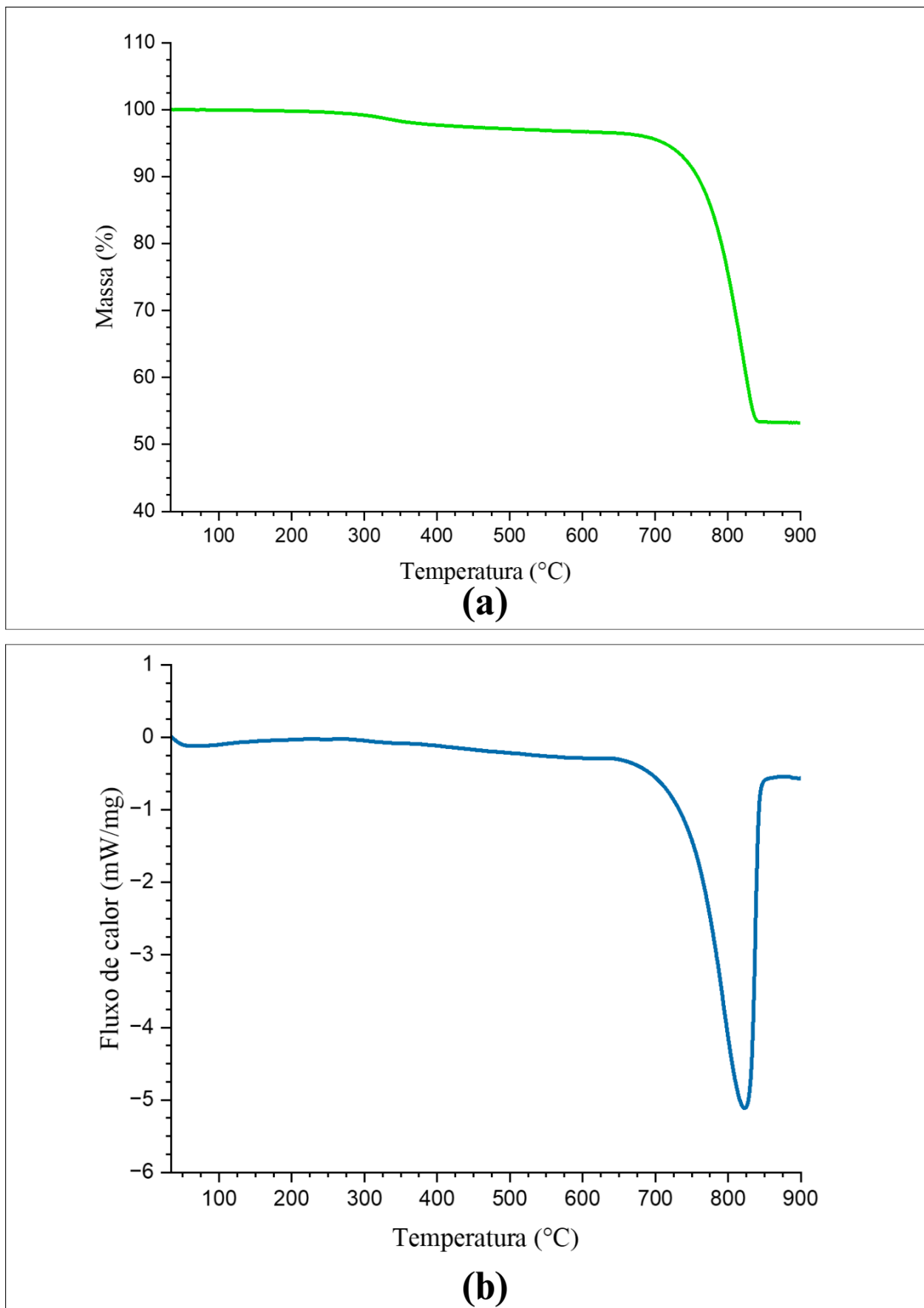
No trabalho de Alencar *et al.* (2022), amostras calcinadas em diferentes temperaturas apresentaram a fase majoritária do CaO com pico principal $2\theta = 37,65^\circ$. Um resultado semelhante é observado no trabalho de Pinto (2021), com amostras calcinadas a 800°C e 900°C , com picos característicos de CaO em fase cúbica de $2\theta = 37,60^\circ$ para a amostra de 800°C .

Assim como apresentado por Alencar *et al.* (2022), o qual descreve que as amostras que foram calcinadas em temperaturas de 650°C e 700°C possuem resquícios de fases secundárias referentes a CaCO_3 e Ca(OH)_2 .

4.1.2 Calorimetria Exploratória Diferencial e Termogravimétrica (DSC/TG)

A análise de TG “avalia as mudanças de massa em função da temperatura, devido à interação com a atmosfera, vaporização e decomposição” (Silva, p. 109, 2011). A resistência térmica do material foi determinada mediante a análise termogravimétrica, em que, segundo Alencar *et al.* (2022), a massa da amostra numa atmosfera controlada é registrada em função do tempo com o aumento de temperatura, visando estudar o caminho de alterações causadas pelo aquecimento da substância. A análise indica a temperatura em que o material atinge determinada composição ou iniciam-se os processos de decomposição, por exemplo. A queda no percentual em massa apresentada no gráfico na Figura 12 demonstra a temperatura de ocorrência de reação química em que o óxido de cálcio é obtido (Vieira *et al.* 2017).

Figura 12 – Curvas TG (a) e DSC (b) da casca do ovo.



Fonte: Autor, 2023.

A partir da análise de TG, identifica-se que a temperatura de decomposição da casca de ovo se deu em torno de 840 °C. Diante disso, observa-se que a amostra de casca de ovo analisada é convertida de CaCO_3 em CaO em temperaturas a partir de 840 °C.

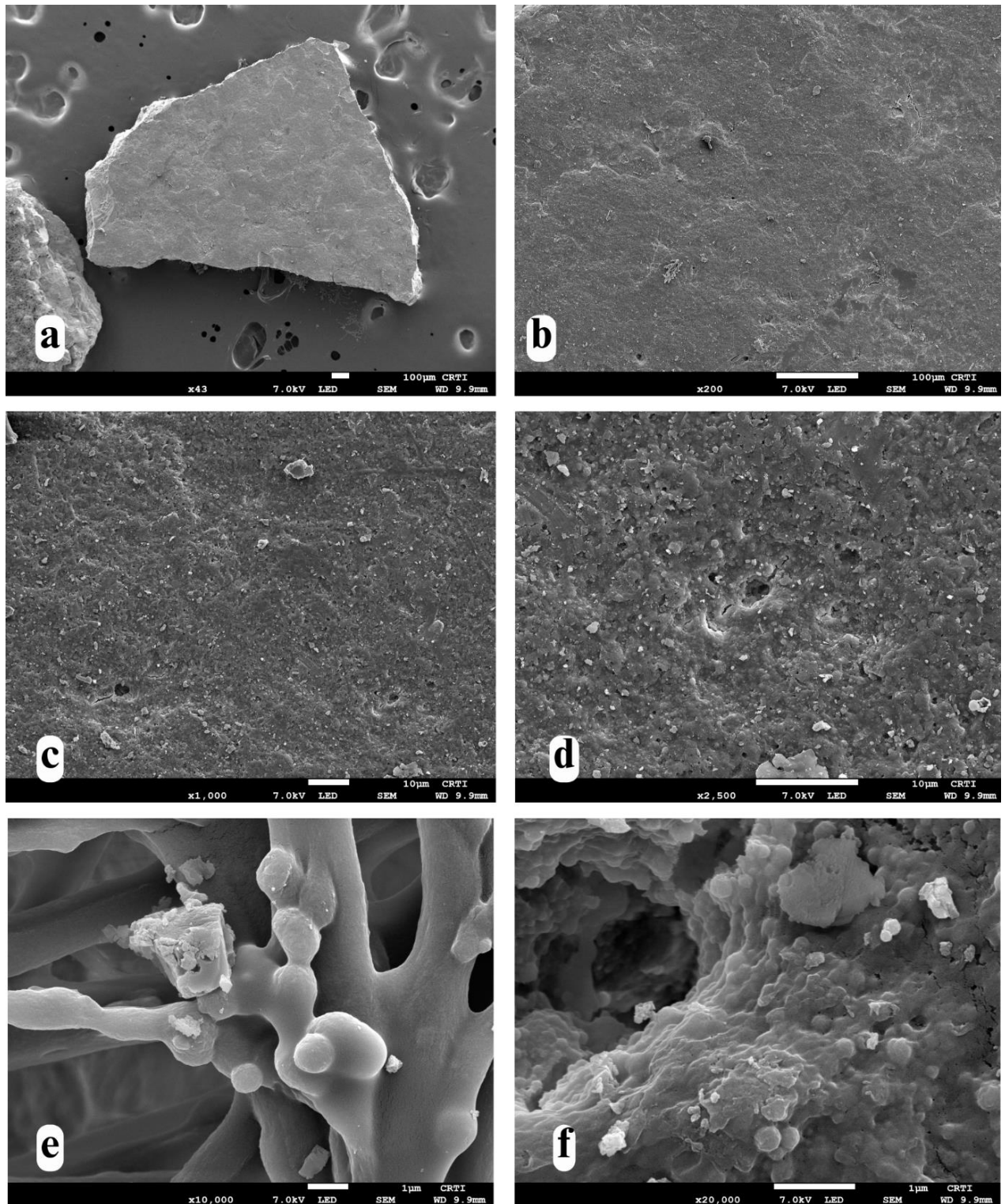
O DSC da amostra apresentou um pico endotérmico de fusão do CaCO_3 em torno de 824 °C, representando as variações de entalpia. Esse pico endotérmico representa a absorção de calor e fusão do CaCO_3 e sua conversão em CaO .

Com base no gráfico apresentado na Figura 12, é possível afirmar que temperaturas acima de 800 °C podem ser utilizadas para obter catalisadores, pois garante a produção de óxido de cálcio na sua forma mais pura a partir da calcinação da casca do ovo de galinha. A queda acentuada da massa da amostra e sua decomposição, evidenciam a temperatura de ocorrência da reação química em que o óxido de cálcio é obtido.

4.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia da casca do ovo *in natura* demonstrou que esta apresenta uma superfície bastante irregular, conforme observado na Figura 13. A partir dessa análise, foi possível avaliar as características microestruturais das partículas (Cordeiro, 2019) da amostra. A morfologia observada é semelhante ao que se observa no trabalho descrito por Castro (2017), em que a casca do ovo é descrita como uma superfície irregular, sem estrutura porosa definida e com distribuição heterogênea de partículas.

Figura 13 – MEV da casca do ovo in natura ampliada 43x (a); 200x (b); 1000x (c); 2500x (d); 10000x (e) e 20000 (f).

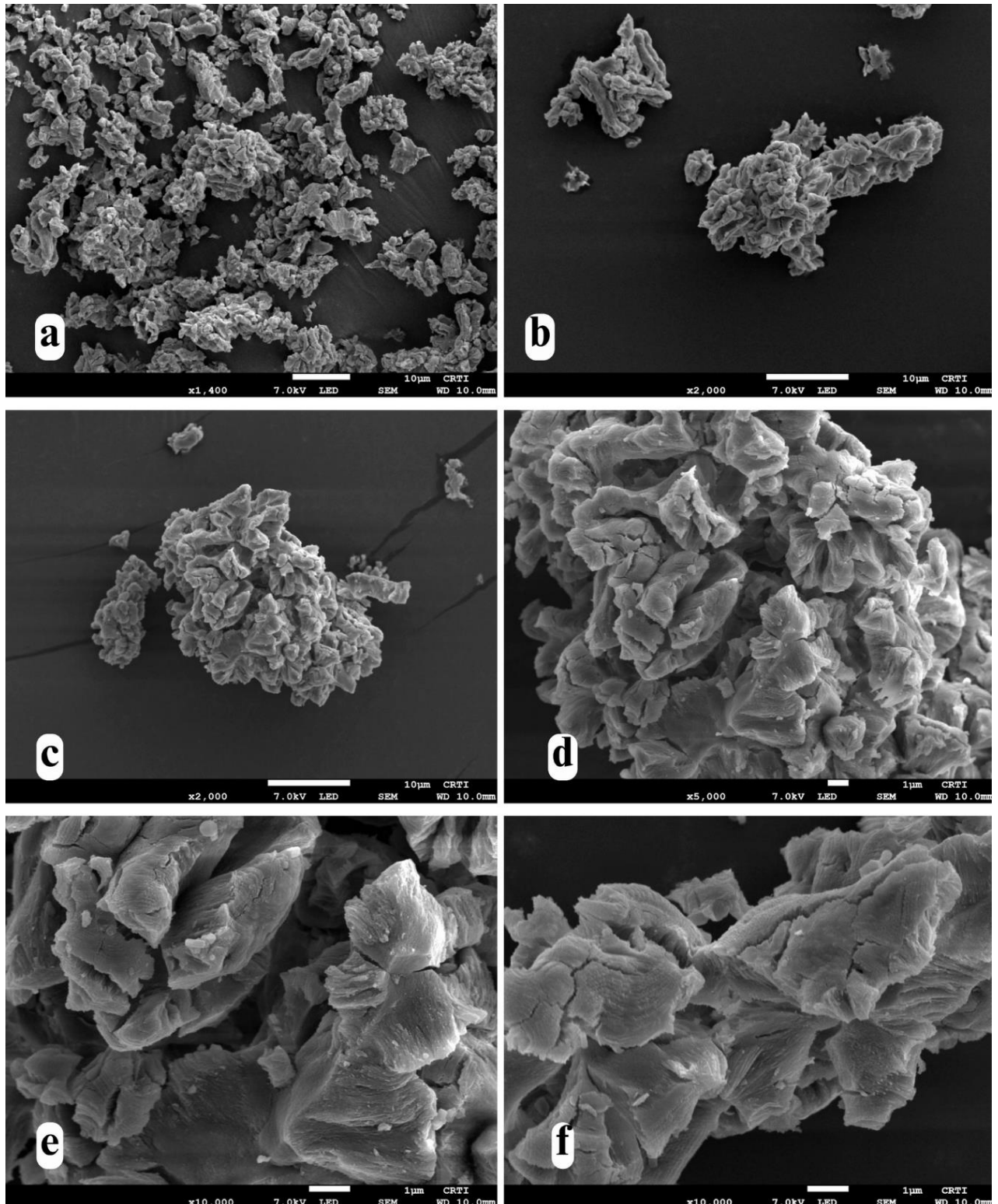


Fonte: Autor, 2023.

Já com o tratamento térmico, o composto obtido apresentou mudança em sua morfologia, conforme observado na Figura 14. Assim como no trabalho Castro (2017), a casca

do ovo passou a apresentar um esqueleto interligado e ainda se observou que as partículas se encontram mais homogêneas. O óxido de cálcio produzido apresentou o formato de bastonetes.

Figura 14 – Micrografias da casca do ovo calcinada durante 4h ampliada 1400x (a); 2000x (b) e (c); 5000x (e) e 10000x (f).



Fonte: Autor, 2023.

De acordo com o trabalho de Castro (2017), a porosidade do CaO está ligada ao desprendimento do dióxido de carbono da estrutura interna. Catalisadores com maior área superficial possuem tendência a exibir melhor desempenho em reações catalíticas (Nogueira, 2020). Conforme Souza, Jorge e Santos (2008), a calcinação conduz a um aumento da área específica. Dessa forma, a mudança morfológica observada no material calcinado indica uma maior área superficial em comparação ao material in natura, resultado que conduz a um melhor desempenho do catalisador.

4.2 Síntese do Biodiesel

4.2.1 Pré-tratamento e caracterização físico-química do sebo bovino

Para a produção do biodiesel, utilizou-se duas matérias-primas (sebo bovino) que receberam tratamentos diferentes. Uma denominada A apresentava uma coloração um pouco mais amarelada que o sebo B, conforme mostrado na Figura 15. Essa diferença pode ser em decorrência das condições de fritura de cada uma delas e o armazenamento. Já que o sebo A foi armazenado por duas semanas antes da reação, enquanto o sebo B foi utilizado no dia seguinte ao derretimento.

Figura 15 – Aspecto físico dos sebos bovinos A e B utilizados na produção do biodiesel.



Fonte: Autor, 2023.

Conforme Rost (2021), não existem parâmetros específicos de qualidade para o sebo bovino após o processo de derretimento, portanto, para a caracterização físico-química através

da determinação de suas densidades e índice de acidez, conforme os parâmetros da Tabela 03, encontram-se os resultados dos testes obtidos em laboratório em comparação com os parâmetros de gorduras e óleos modificados (submetidos a processos de alteração físicas e ou químicas) e parâmetros de óleos e gorduras que tenham altas porcentagens de ácido oleico e ácido palmítico, os quais são os principais óleos da composição do sebo bovino.

Tabela 03 – Caracterização físico-química do sebo bovino.

Análise	Sebo A	Sebo B	Parâmetro	Limite
Densidade	0,9932 g/cm ³	0,8679 g/cm ³	DIN 51606 (1997)	0,875 e 0,90 g/cm ³
Média do Índice de Acidez	11,0809 mg KOH/g ± 0,4294	1,3433 mg KOH/g ± 0,0565	ANVISA- RDC nº 482, de 23 de setembro de 1999	< 3 (mg KOH/g)

Fonte: Autor, 2023.

O teste de densidade demonstrou que o sebo A estava fora da especificação de acordo com o parâmetro utilizado, com uma densidade de 0,99326 g/cm³, além de também apresentar Índice de Acidez acima do limite estabelecido pela ANVISA, através da RDC nº 482, de 23 de setembro de 1999. Em contrapartida, o sebo B atende ao parâmetro referente ao limite de densidade, com o resultado de 0,88772 g/cm³, e fica dentro do limite de acidez, com o resultado 1,3433 mg KOH/g, cujo limite deve ser inferior a 3 mg KOH/g.

Segundo Silva *et al.* (2010), o índice de acidez é uma análise importante, pois a elevada acidez, além de dificultar a reação de produção de biodiesel, pode provocar a corrosão do motor ou deterioração do biocombustível. Assim, a determinação da acidez é muito importante para evitar problemas com a reação e na qualidade do produto obtido.

Vieira *et al.* (2017) afirma que, um sebo de qualidade precisa apresentar um índice de acidez máximo de 4 mg KOH/g, enquanto para a ANVISA (Resolução RDC nº 482, de 23 de setembro de 1999), a amostra analisada deve ficar dentro da norma estabelecida, que prevê uma acidez máxima de 3 mg KOH/g. Nesse sentido, o sebo A não atendeu as especificações.

Um elevado índice de acidez indica que o material está sofrendo quebra na cadeia dos glicerídeos e liberando ácidos graxos livres (Vieira *et al.*, 2017). Conforme estudos de Ferreira, Pereira e Oliveira (2014), a acidez está intimamente ligada a umidade, uma vez que o aumento da umidade faz com que a matéria-prima se torne mais ácida. Sendo assim, em tempos chuvosos o sebo tem maior umidade e, conseqüentemente, maior acidez, e em tempos secos, menor umidade e acidez. Kleinberg *et al.* (2016) afirma que o grande problema do sebo bovino é relacionado aos elevados índices de acidez, que são consequência do processo de rancificação

hidrolítica e oxidativa. Segundo Rodrigues (2016, p. 13), “A rancidez hidrolítica é um processo no qual há hidrólise da ligação éster dos lipídeos a partir da ação das enzimas lipases que tem por catalisadores o calor (através do processo de fritura contínua, por exemplo) e umidade”. Esse processo altera as características sensoriais do óleo, resultando em ácidos graxos livres (Rodrigues, 2016).

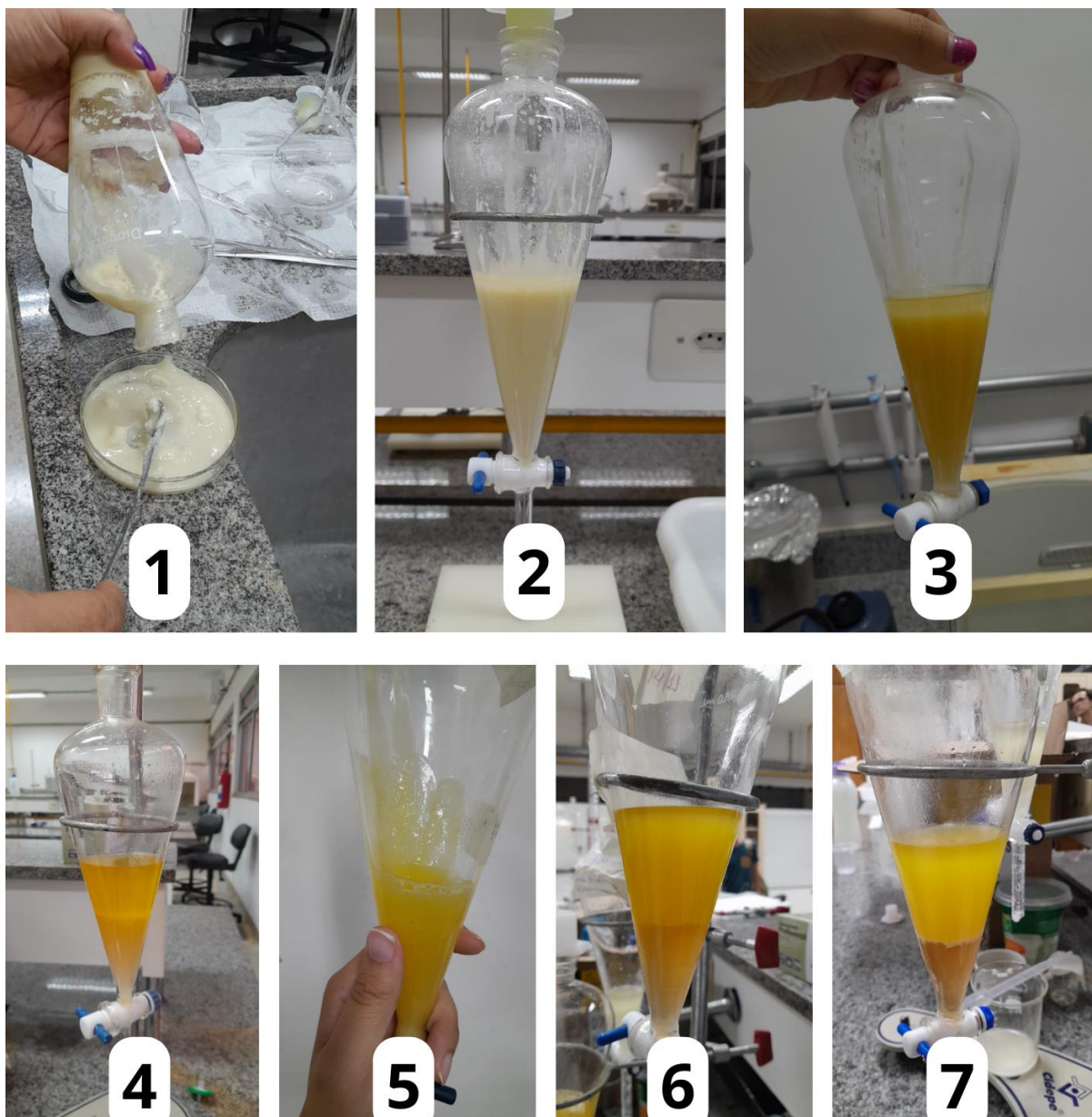
Apesar de fora dos padrões, o sebo A foi utilizado nas reações, a fim de verificar se haveria reação.

4.2.2 Reação de transesterificação via catálise heterogênea com CaO

Inicialmente, realizou-se as reações de transesterificação utilizando o sebo bovino A, de acordo com os parâmetros reacionais apresentados na Tabela 2 (pág. 32). Os testes 1, 2, 3 e 5 não proporcionaram a conversão do sebo em biodiesel, o que se deve a condição da matéria-prima utilizada.

As amostras 1 e 2, conforme apresentado na Figura 16, solidificaram logo após o final da reação. Em temperatura ambiente, a gordura animal tende a solidificar (Embrapa, 2021), em vista disso, é possível concluir que a reação de transesterificação não foi concluída nos testes 1 e 2. A Figura 16 apresenta os testes de reação de 1 a 7 realizados com o sebo A.

Figura 16 - Testes de produção do biodiesel, conforme parâmetros reacionais descritos na Tabela 2, utilizando o sebo A.

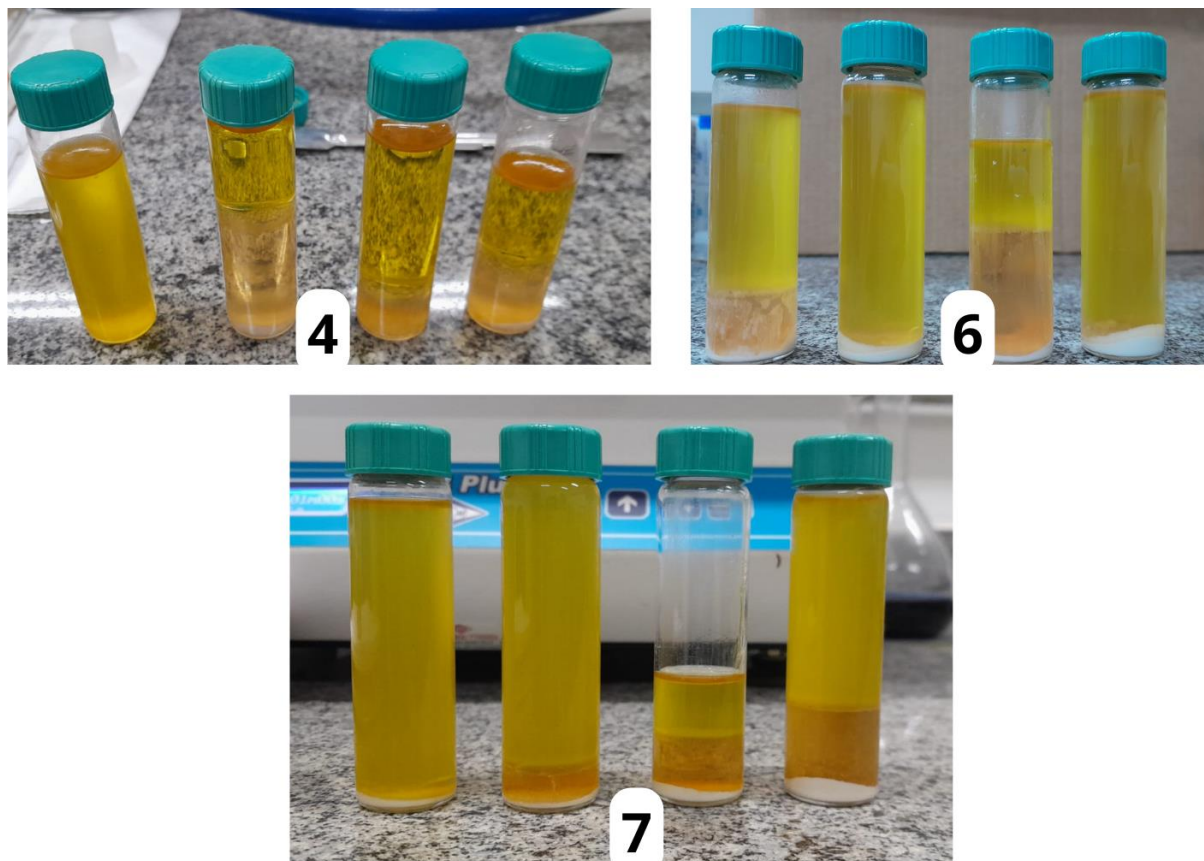


Fonte: Autor, 2023.

Com a formação dos ésteres que compõe o biodiesel e a glicerina, forma-se duas fases no funil. A separação das fases é observada na Figura 16, mostrando a separação das duas fases por decantação, pois apresentam densidades diferentes e, dessa forma, não se misturam.

De acordo com a Figura 16, nos testes 4, 6 e 7 apresentaram a conversão do sebo em biodiesel apesar do sebo estar fora das especificações. Na Figura 17 é mostrado os testes 4, 6 e 7 após a centrifugação para melhor separação de fases e do catalisador. O catalisador é observado no fundo, em razão da diferença de densidade.

Figura 17 – Testes de produção do biodiesel, conforme parâmetros reacionais descritos na Tabela 2, utilizando o sebo A, após a centrifugação.



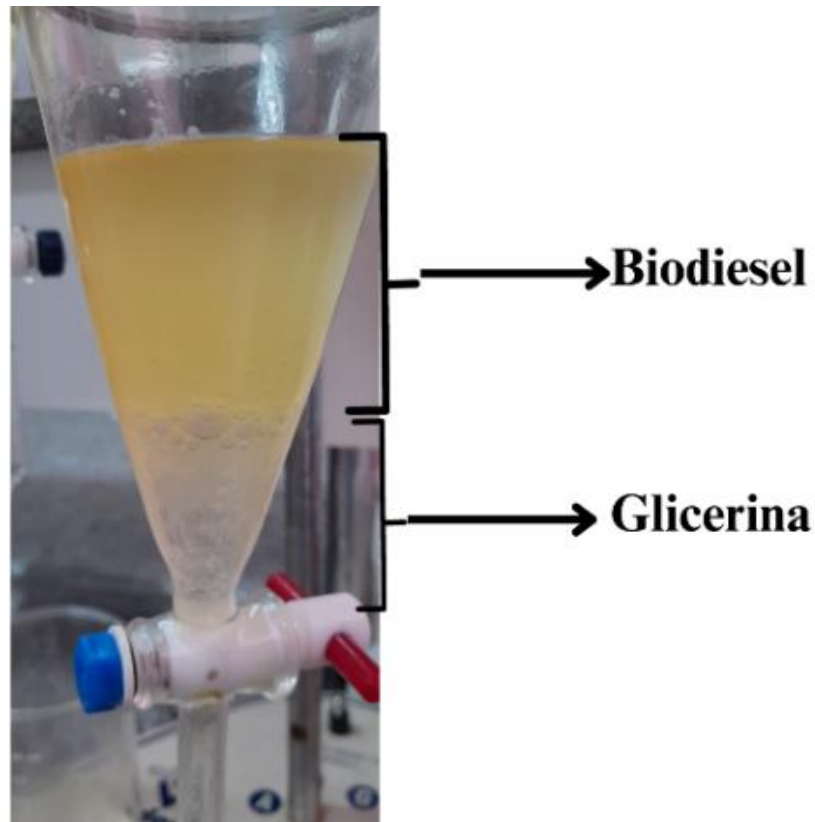
Fonte: Autoral, 2023

Após os testes de produção, evidenciou-se que o índice de acidez elevado da matéria-prima A pode ter sido o causador das dificuldades iniciais durante a reação de transesterificação. Conforme o trabalho de Vasconcelos (2016), uma acidez elevada dificulta o processo de transesterificação. Ou seja, as dificuldades encontradas para conversão do sebo em biodiesel podem estar interligadas com os altos níveis de acidez do sebo A.

O melhor resultado da reação foi no teste 8, com o sebo B, o que se deve aos resultados dentro dos parâmetros de acidez e densidade, comprovando a importância da caracterização inicial da matéria-prima para a produção de biodiesel.

Para as produções de biodiesel realizadas com o sebo B, observou-se um resultado favorável no teste 8, como pode ser visualizado na Figura 18, na qual o sebo foi convertido em biodiesel na condição reacional: razão sebo: álcool 1:20, com 8% de catalisador e tempo de reação de 3 horas sob agitação em banho-maria a temperatura 65°C.

Figura 18 – Teste de produção de biodiesel o sebo B de acordo com os parâmetros da Tabela 2, no teste 8.



Fonte: Autor, 2023.

A amostra de biodiesel obtido com o sebo B foram convertidas conforme as condições reacionais apresentadas na Tabela 02 (pág. 32) no teste 8. Já era esperado que o sebo B apresentasse uma conversão melhor que o sebo A, uma vez que o sebo A se encontrava fora da especificação. Apenas um teste de conversão foi realizado para comprovar a eficácia do catalisador de CaO na conversão de sebo a biodiesel na transesterificação por via metílica, em razão do tempo da pesquisa. Não foram realizados testes de quantificação para o biodiesel produzido. A Figura 19 mostra o biodiesel produzido com o sebo B após a centrifugação.

Figura 19 – Teste de produção do biodiesel, conforme parâmetros reacionais descritos na Tabela 2 para o teste 8, utilizando o sebo B, após a centrifugação.



Fonte: Autoral, 2023.

A parte inferior é coletada e armazenada, e a fase do biodiesel é submetida a lavagens para aumentar o grau de pureza deste. A glicerina, apresentada na Figura 20, é um subproduto originado durante a reação de produção do biodiesel, que pode ser utilizada como matéria-prima para outros produtos, como resinas, fármacos e produtos alimentícios. Dessa forma, ela é considerada um subproduto e não um resíduo.

Figura 20 – Glicerina coletada após a separação do biodiesel.



Fonte: Autor, 2023.

4.2.3 Caracterização do biodiesel de sebo bovino

Na Tabela 04, estão apresentados os resultados para a caracterização do biodiesel. Segundo a ANP (2023), o limite de acidez para o biodiesel é 0,50 mg KOH/g. O biodiesel produzido com a matéria-prima A não atende ao parâmetro estabelecido, uma vez que seu índice de acidez é 4,4062 mg KOH/g. O biodiesel é decorrente da acidez do sebo A. Já a matéria-prima B apresentou uma acidez de 0,3220 mg KOH/g, atendendo a especificação exigida pela ANP (2023). Quanto ao parâmetro da densidade, os dois biodieseis atendem ao parâmetro estabelecido pela ANP (2023), com o limite entre 0,850 e 0,900 g/cm³.

Tabela 04 – Caracterização físico-química dos biodieseis produzidos com as matérias-primas A e B nos testes 7 e 8, respectivamente.

Análise	Biodiesel com sebo A e teste 7	Biodiesel com sebo B e teste 8	Parâmetro	Limite
Densidade	0,8641 g/cm ³	0,8692 g/cm ³	ANP (2023)	0,850 a 0,9 g/cm ³
Média do Índice de Acidez	4,4062 mg KOH/g ± 0,3376	0,3220 mg KOH/g ± 0,09963	ANP (2023)	0,50 mg KOH/g

Fonte: Autor, 2023.

A caracterização inicial da matéria-prima utilizada é essencial para a produção de biodiesel, visando a obtenção de um produto com qualidade que atenda aos parâmetros da legislação em vigor. Além disso, nota-se que as reações de transesterificação via catálise heterogênea com CaO foram realizadas com sucesso para os testes 3, 4, 6, 7 e 8, apesar das dificuldades de conversão durante os testes de reação, em razão da proporção do catalisador, da razão sebo: álcool, tempo maior de reação e controle de temperatura. O óxido de cálcio foi extraído com sucesso de cascas de ovo de galinha, demonstrando a viabilidade de sua aplicação na produção de biodiesel de sebo bovino, o que representa a reutilização de dois resíduos que seriam descartados de forma inadequada em lixões ou aterros sanitários.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A síntese do óxido de cálcio oriundo da casca de ovos de galinha foi realizada com sucesso através da calcinação em forno mufla à temperatura de 850°C em dois tempos diferentes. Através da caracterização do catalisador, por meio das técnicas de difração de Raios X, DSC/TG, verificou-se que a temperatura utilizada na síntese do CaO foi eficiente. As micrografias de MEV também apresentaram diferenças. também apresentaram as diferenças entre as morfologias da casca de ovo *in natura* e a amostra calcinada, evidenciando que houve a formação de poros. Sob a forma de um pó, após a calcinação, aumenta o volume dos poros e o potencial de abranger a área superficial.

A reação de transesterificação utilizando o CaO com metanol para a conversão do sebo em biodiesel enfrentou desafios durante os testes laboratoriais. A acidez elevada do sebo A foi um fator que dificultou a conversão desta em biodiesel, entretanto, esses problemas não foram observados com o sebo B. Além disso, testou-se diversas quantidades de catalisador durante os testes de produção. As condições: 20% de catalisador com razão molar sebo: álcool 1:12 e tempo reacional de 1h; e 1:12 com 8% de catalisador e 3h de tempo reacional foram as que obtiveram pior resultado qualitativo de produção apresentando o endurecimento do produto logo após o fim da reação. Enquanto a condição com 8% de catalisador e razão molar sebo: álcool 1:20 e tempo reacional de 3h foi a condição com melhor conversão dos triglicerídeos em ésteres, apesar das dificuldades relacionadas à acidez elevada da matéria-prima.

Por fim, conclui-se que a obtenção do CaO das cascas de ovos de galinha e sua aplicação como catalisador retira do meio ambiente um resíduo que seria descartado em aterros sanitários ou lixões de forma, muita das vezes, inadequada. Além disso, o sebo bovino, subproduto das indústrias de carnes tem um baixo custo agregado e é uma alternativa viável na produção de biodiesel. Por fim, a utilização conjunta dessas duas matérias-primas de origem residual, mostrou-se atrativa para a produção de biodiesel por conta de sua alta disponibilidade, reciclagem de resíduos e menor toxicidade em comparação com outros catalisadores que tenham origem ácida, alcalina ou presença de metais pesados.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, propõe-se as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- Construir um planejamento experimental para a produção de biodiesel de sebo bovino com o catalisador CaO ;
- Realizar testes para a recuperação e reutilização do catalisador CaO ;
- Realizar mais análises para a caracterização do biodiesel e sebo bovino, como: Índice de Peróxido, Viscosidade, Índice de Saponificação, entre outras.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, S. G. C. et al. Óleo residual de fritura e sebo bovino: matérias-primas alternativas à produção de biodiesel. **Revista Técnico-Científica do IFSC**, v. 1, n. 10, p. 21-21, 2020.
- ALENCAR, A. O. de; *et al.* Synthesis and Physico-Chemical Characterization of Biomaterial CaO Obtained from Chicken Egg Shells. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 8, p. e45311830807, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i8.30807. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/30807>. Acesso em: 27 nov. 2023.
- ANP. **Anuário estatístico 2022**. Brasil, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario--estatistico-2022>>. Acesso em 26 de mai. 2023.
- ANP. **Especificação do Biodiesel**. Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-bicombustiveis/biodiesel/especificacao-do-biodiesel>. Acesso em: 12 nov. 2023.
- ANP. **Especificação do biodiesel**. Brasil, 2023. Portal. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-bicombustiveis/biodiesel/especificacao-do-biodiesel>. Acesso em: 15 out. 2023.
- ANVISA. **Lei nº 482, de 23 de setembro de 1999. Regulamento Técnico para Fixação de Identidade e Qualidade de Óleos e Gorduras Vegetais**. Brasília, 23 set. 1999. Disponível: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/1999/res0482_23_09_1999.html. Acesso em: 25 nov. 2023.
- ARAÚJO, D. . F. C. de .; SOBRINHO, F. L. A. . O futuro dos biocombustíveis: Análise do cenário atual e perspectivas para o setor no Brasil. **Geopauta**, [S. l.], v. 7, p. e12766, 2023. DOI: 10.22481/rg.v7.e2023.e12766. Disponível em: <https://periodicos2.uesb.br/index.php/geo/article/view/12766>. Acesso em: 14 nov. 2023.
- BIODIESELBR.COM. **Sebo**. Biodieselbr.com. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/plantas/sebo>>. Acesso em: 18 fev. 2024.
- BORGES, et. al. Obtenção do óxido de cálcio (cao), de origem natural, para aplicação como catalisador na produção de biodiesel etílico de soja. *In*: Congresso Brasileiro de Biotecnologia, 3., 2023, On-line. **Anais III Congresso Brasileiro de Biotecnologia**. 2023. Disponível em: < https://www.researchgate.net/profile/Camila-De-Jesus-Fonseca-Borges/publication/369781210_OBTENCAO_DO_OXIDO_DE_CALCIO_CAO_DE_ORIGEM_NATURAL_PARA_APLICACAO_COMO_CATALISADOR_NA_PRODUCAO_DE_BIODIESEL_ETILICO_DE_SOJA/links/651ebcbbfc5c2a0c3bb80f57/OBTENCAO-DO-OXIDO-DE-CALCIO-CAO-DE-ORIGEM-NATURAL-PARA-APLICACAO-COMO-CATALISADOR-NA-PRODUCAO-DE-BIODIESEL-ETILICO-DE-SOJA.pdf >. Acesso em: 17 mar. 2024.

BRASIL, **Especificação do biodiesel**. Brasil, 28 mar. 2022. Portal: gov.br. Disponível em: <[://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/especificacao-do-biodiesel](http://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/especificacao-do-biodiesel)>. Acesso em: 23 set. 2022.

BRASIL, **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de biocombustíveis / organizador Régis Rathmann**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente, 2017. Portal: gov.br. Disponível em: <modelagem-setorial-de-opcoes-de-baixo-carbono-para-o-setor-de-biocombustiveis.pdf (www.gov.br)>. Acesso em: 22 set. 2022.

BRASIL. **Governo oficializa ampliação da mistura de biodiesel no diesel vendido no país**. Brasília, 2023. Portal. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2023/03/governo-oficializa-ampliacao-da-mistura-de-biodiesel-no-diesel-vendido-no-pais#:~:text=A%20partir%20de%201%C2%BA%20de,2026%2C%20chegar%C3%A1%20aos%2015%25>. Acesso em: 01 nov. 2023.

BRITO, B. G *et al.* **Produção e curiosidade sobre o ovo**. Porto Alegre: SEAPDR/DDPA, 2021. 26 p.

BUENO, L. N. **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE CATALISADOR HETEROGÊNEO PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa.

CASTRO, L. d. S. **Produção de biodiesel de óleo de algodão utilizando catalisador heterogêneo sintetizado a partir da casca de ovo**. 2017. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2017.

CASTRO, L. S.; BARAÑANO, A. G. Caracterização do catalisador e casca de ovo in natura pelo método do indicador de Hammett. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 4, n. 1, p. 72-76, 2017.

CASTRO, L. S; BARAÑANO, A. G. Aplicação do CaO oriundo da casca de ovo de galinha para a produção de biodiesel: uma revisão. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia**-ISSN: 1984-5693, v. 10, p. 182, 2018.

CORDEIRO, D. O. **Avaliação de catalisadores heterogêneos obtidos a partir das cascas do ovo, para síntese de biodiesel**. 2019. 133f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

COSTA, F. R. T. DA. **Microscopia Eletrônica de Varredura: potencialidades e aplicações**. 2016. Monografia (Graduação) – Curso de Química industrial, Universidade Federal do Maranhão, São Luiz, 2016.

CUNHA, M. E. **Caracterização de Biodiesel produzido com misturas de matérias primas: sebo bovino, óleo de frango e óleo de soja**. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DALCOLLE, J. C. *et al.* Tratamento e caracterização físico-química do óleo de fritura e sebo bovino para a obtenção de blendas líquidas para a produção de biodiesel. *In: EPCC - Encontro Internacional de Produção Científica*, 18., 2013, Brasil. **Anais [...]**. Brasil: Universidade Cesumar, 2013. p. 1-4.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. EdIPUCRS, 2007.

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. T. G. **Princípios e aplicações de análise térmica**. São Carlos: IQSC, 2012. 40 p.

DIN, DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN 51606 - Liquid fuels - Diesel fuel of fatty acid methylester (FAME) – Specifications.

Embrapa. **Biocombustíveis**. Brasil. 2021. Portal Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pos-producao/agroenergia/biocombustiveis>>. Acesso em: 14 nov. 2023.

EMBRAPA. **Biodiesel**. Brasil, 08 dez. 2021. Portal: Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel#:~:text=As%20principais%20mat%C3%A9rias%20primas%20para,residuais%20e%20de%20gorduras%20animais>. Acesso em: 10 nov. 2022.

EMBRAPA. **Gordura animal**. Brasil, 08 dez. 2021. Portal: Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel/materias-primas/gordura-animal#:~:text=Cerca%20de%201%2C560%20milh%C3%A3o%20de,at%C3%A9%20800%20ml%20de%20biodiesel>. Acesso em: 10 nov. 2022.

EMBRAPA. **Gordura Animal**. Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel/materias-primas/gordura-animal>. Acesso em: 08 ago. 2023.

EMBRAPA. **Transesterificação**. Brasil. 2021. Portal. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel/tecnologia/transesterificacao>. Acesso em: 10 out. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis: Ano 2021**. 2022. Portal. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-688/NT-EPE-DPG-SDB-2022-02_Analise_de_Conjuntura_dos_Biocombustiveis_2021.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, **Matriz Energética e Elétrica**. 2021. Portal. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcedenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 21 set. 2022.

FERREIRA, L. A.; PEREIRA, N. C.; OLIVEIRA, S. M. Alternativas viáveis para a redução da acidez no sebo bovino. In: Anais do Congresso brasileiro de Engenharia química, 2014, **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2014. Disponível em: <https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2014/papers/alternativas-viaveis-para-a-reducao-da-acidez-no-sebo-bovino?lang=pt-br>. Acesso em: 05 set. 2023.

FREITAS, B. R. *et al.* Estudo Da Produção De Biodiesel A Partir De Óleo De Babaçu Usando Óxido De Cálcio Como Catalisador. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 13, 2019, Uberlândia. **Anais COBEQ...** Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/71b5/98939ad20222df23962fdb6d586f5ae91599.pdf>. Acesso em: 28 set. 2022.

FREITAS, E. S. C., XAIVER, L. H., SALES, E. A. A importância do Biodiesel de sebo bovino e seus subprodutos através da logística reversa. In: Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2, 2016, Campina Grande. **Anais II CONEPETRO...** Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/26778>. Acesso em: 10 nov. 2022.

GARCIA, L. S. A. **As técnicas térmicas como ferramenta no estudo de compatibilidade IFA-excipientes: uma revisão.** 2022. 24f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Farmácia), Departamento de Farmácia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p.

IBGE. **Em 2021, abate de bovinos cai pelo segundo ano seguido e o de frangos e de suínos batem recordes.** 15 mar. 2022. Portal Agência IBGE Notícias. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/33211-em-2021-abate-de-bovinos-cai-pelo-segundo-ano-seguido-e-o-de-frangos-e-de-suinos-batem-recordes> Acesso em: 11 nov. 2022.

KLEINBERG, M. N. *et al.* Avaliação do uso de antioxidantes comerciais na estabilidade oxidativa de sebo bovino. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 16., 2016, Fortaleza. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química.** Fortaleza: Repositório UFG, 2016.

LIMA FILHO, L. R. *et al.* Revisão: Biodiesel – emitidos, produção e sua influência na matriz 50 energética brasileira. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, 9., 2017, Sergipe. **Anais do IX Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe.** Sergipe: Repositório Institucional da Universidade Federal de Sergipe, 2017. p.559-557. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/197138144.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2023.

LIMA, V. S.; FLUMIGNAN, D. L. Desenvolvimento e avaliação do método analítico para determinação dos teores de sódio, potássio e cálcio em biodiesel por fotometria de chama. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n.1, p.21-28, 2017.

MACHADO, B. S. **Caracterização da rugosidade em superfícies Nitretadas a plasma da liga ti6al4v.** 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Santa Maira. Bacharel em Física. Disponível em: <

https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/2487/Machado_Bruno_Serpa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 mar. 2024.

MEDEIROS, N. C. **Obtenção de biodiesel de sebo bovino utilizando catalisadores em fases homogênea e heterogênea**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Uberlândia. Bacharel em Ciências Biológicas.

MENEGHETTI, S. P.; MENEGHETTI, M. R.; BRITO, Y. C. A reação de transesterificação, algumas aplicações e obtenção de biodiesel. **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 1, p. 63-73, 2013.

NOGUEIRA, J. S. M. **Aplicação de catalisadores heterogêneos ácidos para a conversão de glicose e celulose em hidroximetilfurfural**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa de Graduação em Engenharia Química na Área de Desenvolvimento de Produtos e Processos) - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena, 2020.

OLIVEIRA, F. C. C; SUAREZ, P. A. Z; SANTOS, W. L. P. dos. Biodiesel: possibilidades e desafios. **Química Nova na Escola**, v. 28, n. 3, 2008.

OSAWA, C. C.; GONÇALVES, L. Ap. G. Titulação potenciométrica aplicada na determinação de ácidos graxos livres de óleos e gorduras comestíveis. **Química Nova** [online]. 2006, v. 29, n. 3, p. 593-599. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000300031>>. Acesso em: 25 fev. 2024.

PANDOLFI, L. *et al.* Utilização da casca de ovo de galinha como estratégia de aumento de cálcio em alimentos. **Saúde e meio ambiente: revista interdisciplinar, [S. l.]**, v. 11, p. 59–70, 2022. DOI: 10.24302/sma.v11.3556. Disponível em: <https://www.periodicos.unc.br/index.php/sma/article/view/3556>. Acesso em: 1 dez. 2023.

PEREIRA, A. M. **Estudo do processo de craqueamento térmico catalítico do sebo bovino para produção de biocombustível**. 2017. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Belém, 2017.

PEREIRA, C. C. A. **Catálise heterogênea para a obtenção de biodiesel de babaçu (*Attalea vitrivar*) da região do Rio Pandeiros – MG**. 2019. 73 p. Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis) – Programa de Pós-graduação em Biocombustíveis, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2019.

PEREIRA, T. M. M. **Caracterização térmica TG/DTG, DTA, DSC, DSC-fotovisual de hormônios bioidênticos estriol e estradiol**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – UFRN. Natal, 2013. 104f.

PINTO, R., R. **Preparação e caracterização de catalisador heterogêneo sintetizado a partir da casca de ovo para produção de biodiesel**. 2021. 123 f. Tese de mestrado (Mestrado em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

REIS, D. C. N. S. P. **Importância do estudo da área superficial específica e porosidade do estearato de magnésio para o setor farmacêutico**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso

(Especialização) – Instituto de Tecnologia em Fármacos, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <
<https://www.arca.fiocruz.br/bitstream/handle/icict/7720/25.pdf?sequence=2&isAllowed=y>>.
 Acesso em: 20 mar. 2024.

RIBAS, W. F. *et al.* Influência do combustível (diesel e biodiesel) e das características da frota de veículos do transporte coletivo de Curitiba, Paraná, nas emissões de NOx. **Eng Sanit Ambient.** Curitiba, PR, v.21, n.3, p. 437-445, jul/set 2016. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/esa/a/5x4qtPPGNXtry48x9GWqtqP/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 22 dez. 2023.

ROCHA, A. L. S. **Avaliação de materiais alternativos como potenciais catalisadores para obtenção de biodiesel a partir de óleo de soja.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2021. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/235674> Acesso em: 12 nov. 2022.

RODRIGUES, G. M. **Determinação de Índices de Acidez e de Peróxido em Azeite de Oliva Extra Virgem Acondicionado em Embalagens Plásticas Sob Diferentes Exposições à Luz.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Alimentos) - Instituto Federal de São Paulo, Barretos, 2016.

ROSA, F. S. **Análise Térmica e econômica da produção de cal.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

ROSSI, G. Z. *et al.* Análise técnica da produção do biodiesel a partir do óleo de fritura residual. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 4, n. 1, p. 0101-0108, 2018.

ROST, É. **Produção de biodiesel de sebo bovino assistida por banho de ultrassom utilizando o planejamento experimental.** 2022. 56 p. Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura em Química) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2022. Disponível em: <http://repositorio.ifg.edu.br:8080/handle/prefix/873>. Acesso em: 30 ago. 2022.

SABOYA, R. M. A. **Produção de biodiesel empregando catalisadores nanoestruturados do tipo SBA-15 modificada com lantânio.** 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

SANTOS, K. N. **Obtenção de biodiesel via catálises homogênea e heterogênea a partir do óleo do maracujá amarelo (Passiflora edulis Sims f. flavicarpa Degener).** 2015. 39 p. Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília Faculdade do Gama, Brasília, 2015.

SEIBEL, N. F.; KATO, T.; LIMA, A. R. Importância da difração de raios X e colorimetria em alimentos. VERRUCK, S. **Avanços em ciência e tecnologia de alimentos.** Editora Científica Digital, v. 6, p. 219-235, 2022.

SILVA, C. B. **Produção de biodiesel utilizando tensoativo e cascas de ovos de galinha.** 2020. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

SILVA, E. P. et al. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ACIDEZ EM ÓLEO DE MILHO PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL. In: Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação, 5., 2010, Maceió. **Anais [...]**. Maceió, 2010. Disponível em:

<<http://connepi.ifal.edu.br/ocs/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/1810/1069>>. Acesso em: 03 mar. 2024.

SILVA, R. F. DA. A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais. **Revista Processos Químicos**, v. 14, n. 27, p. 73-82, 22 set. 2020.

SILVA, T. A. R. da. **Biodiesel de óleo residual**: produção através da transesterificação por metanólise e etanólise básica, caracterização físico-química e otimização das condições reacionais. 2011. 152 f. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SILVA, T. L. S. d. **ENZIMAS PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL: UMA PERSPECTIVA GERAL**. 2022. 46 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia) - Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Santa Cruz do Sul, 2022. Disponível em: <https://repositorio.uergs.edu.br/xmlui/handle/123456789/2315>. Acesso em: 23 set. 2022.

SILVA, V. T. et al. Óleo residual de fritura e sebo bovino: matérias-primas alternativas à produção de biodiesel. **Revista Técnico-Científica do IFSC**, v. 1, n. 10, p. 21-21, 2020.

SOUZA, M. C. P.; JORGE, L. M. M.; SANTOS, O. A. A. Descoloração do corante reativo azul 5 G na presença de óxidos mistos promovidos com ferro e prata. In: Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente, 1., 2008, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves, 2016. Disponível em: <https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=49&ano=_primeiro>. Acesso em: 03 mar. 2024.

VARÃO, L. H. R. et al. Vantagens e limitações do sebo bovino enquanto matéria-prima para a indústria brasileira de biodiesel. **HOLOS**, [S. l.], v. 7, p. 39–54, 2017. DOI: 10.15628/holos.2017.5010. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/5010>. Acesso em: 21 set. 2022.

VASCONCELOS, Filipe de Deus. **Biodiesel de óleo de soja e sebo bovino**: caracterização e avaliação das blendas. 2016. 53 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

VIEIRA, L. A. F. et al. Obtenção de óxido de cálcio a partir da casca de ovo de galinha. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa/MG, BR, v. 3, n. 8, p. 1159–1166, 2017. DOI: 10.18540/jcecvl3iss8pp1159-1166. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/2419>. Acesso em: 22 set. 2022.

VILAR, J. S.; SABAA-SRUR, A. U. O.; MARQUES, Ruy Garcia. Composição química da casca de ovo de galinha em pó. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, Curitiba, v. 28, n. 2, 2010.