

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA (PEQ-UFS)

ISABELLA SANTOS NASCIMENTO

**ESTUDO COMPARATIVO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE TELHAS
CERÂMICAS E *MORINGA OLEIFERA* LAM. NA CLARIFICAÇÃO DE
FERMENTADO DE CANA-DE-AÇÚCAR.**

São Cristóvão (SE)

2025

ISABELLA SANTOS NASCIMENTO

**ESTUDO COMPARATIVO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE TELHAS
CERÂMICAS E *MORINGA OLEIFERA* LAM. COMO ETAPA DE FINALIZAÇÃO NA
CLARIFICAÇÃO DE FERMENTADO DE CANA-DE-AÇÚCAR.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador (a): Prof. Dr. Gabriel Francisco da Silva

Coorientador (a): Prof.^a Dr.^a Denise Conceição de Gois Santos Michelan

São Cristóvão (SE)

2025

ISABELLA SANTOS NASCIMENTO

**ESTUDO COMPARATIVO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE TELHAS
CERÂMICAS E *MORINGA OLEIFERA* LAM. COMO ETAPA DE FINALIZAÇÃO NA
CLARIFICAÇÃO DE FERMENTADO DE CANA-DE-AÇÚCAR.**

Dissertação de Mestrado aprovada no Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da
Universidade Federal de Sergipe em 27 de agosto de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gabriel Francisco da Silva – Orientador – PEQ/UFS
Universidade Federal de Sergipe

Prof.^a Dr.^a Denise Conceição de Gois Santos Michelin – Co-orientadora – PROEC/UFS
Universidade Federal de Sergipe

Prof.^a Dr.^a Licianne Pimentel Santa Rosa – PEQ/UFS
Universidade Federal de Sergipe

Prof.^a Dr.^a Rosivânia da Paixão Silva Oliveira – DEPET/UFS
Universidade Federal de Sergipe

AGRADECIMENTOS

A jornada que culmina nesta dissertação não foi trilhada sozinha. Cada página aqui escrita carrega o amparo, o carinho e a força daqueles que caminharam comigo, mesmo quando os ventos sopraram contrários.

À minha família, porto seguro em todas as tempestades, agradeço pelo amor incondicional, pelas palavras silenciosas que me ergueram quando tudo parecia desabar. Vocês são a origem das minhas raízes que sustentam meu florescer.

Ao *Centro Espírita Irmão Fegô*, que me acolheu nas noites em que o espírito buscava luz, minha profunda gratidão. Suas palavras de fé e caridade foram bálsamo em tempos de dor e esperança nos dias sombrios. Foi ali que aprendi que, mesmo diante da maldade do mundo, o amor é sempre possível. À *Igreja Católica do Brasil*, por cada momento de introspecção e paz, por cada ensinamento de humildade e justiça. As liturgias, os gestos e a doutrina me recordam que a fé pode ser a ponte entre a dor e a transformação.

A contribuição afro-brasileira é força que rompe silêncios impostos, voz que resiste contra séculos de apagamento, sabedoria que nutre o solo das universidades, dos terreiros, das ruas e das consciências. Aprendi, nesse percurso acadêmico e espiritual, que cada passo dado foi sustentado por saberes que ultrapassam os livros, agradeço por me lembrarem que lutar pelo conhecimento também é honrar a ancestralidade.

À *Universidade Federal de Sergipe (UFS)*, berço do saber que me ensinou não só o que pensar, mas como resistir, aos funcionários e aos discentes, em especial ao Laboratório Biotecnologia Ambiental (LABAM/DEQ/CCET/UFS), Laboratório de Tecnologias Alternativas (LTA) em parcerias com o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GEOPAV), Laboratório de Materiais de Construção e Estrutura (LAMCE), Laboratório de Bioquímica Industrial (LBI), Condomínio de Laboratórios Multiusuários do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais (CLMDCEM) e Laboratório de Saneamento Ambiental (SAMA).

Dedico minha gratidão às professoras e técnicas que me guiaram com paciência, firmeza e afeto. Mulheres de ciência e coração, que com olhar atento e palavras generosas ajudaram a esculpir não apenas este trabalho, mas também meu caráter. Esta dissertação é fruto de coragem, muitas vezes cultivada na dor; de força, muitas vezes descoberta na queda; e de amor, sempre ofertado por aqueles que, com fé ou razão, me lembraram de que o bem é mais forte que qualquer sombra. A cada um e a cada instituição aqui citada — minha reverência eterna.

RESUMO

Este trabalho investigou o uso de resíduos de telhas cerâmicas e o coagulante natural *Moringa oleifera* Lam. como alternativas sustentáveis e econômicas para a clarificação do fermentado alcoólico de cana-de-açúcar, tradicionalmente feito com argilas bentoníticas. Os resíduos de telhas cerâmicas foram caracterizados por meio do ensaio de peneiramento. As sementes de moringa foram preparadas para atuarem como coagulante. As análises físicas e químicas foram processadas para o caldo de cana-de-açúcar, fermentado, fermentado com adição do coagulante de moringa e com adição de resíduos cerâmicos pulverulentos retidos nas peneiras com aberturas de malhas 425 μm , 250 μm , 150 μm , 75 μm e ensaios foram realizados quanto a cor aparente, turbidez, pH, sólidos totais e metais. As amostras tratadas também foram analisadas quanto ao teor de álcool e teste BET.

Observa-se que todos os tratamentos contribuíram para a clarificação da amostra, com destaque para os resíduos cerâmicos RC # 425 μm e RC # 250 μm , que demonstraram maior eficiência na redução da turbidez e da cor aparente. O tratamento com Moringa, embora eficaz na remoção de impurezas, apresentou o maior aumento na condutividade elétrica, indicando liberação significativa de sais solúveis. Já os tratamentos com fermentação mantiveram valores relativamente estáveis de pH e condutividade, atuando de forma moderada sobre os parâmetros analisados. A combinação de ambos os materiais demonstrou eficiência na clarificação, resultando em um fermentado mais limpo e com menor custo ambiental. Esse processo está alinhado aos ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), mostrando-se uma alternativa promissora e viável para a indústria de bebidas alcoólicas e para o ramo de biocombustíveis.

Palavras-Chave: Clarificação, Fermentado alcoólico, Resíduos de telhas cerâmicas, *Moringa oleifera* Lam. e Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study investigated the use of ceramic tile waste and the natural coagulant *Moringa oleifera* Lam. as sustainable and economical alternatives for the clarification of sugarcane alcoholic fermentate, traditionally done with bentonite clays. The ceramic tile waste was characterized through sieve analysis. Moringa seeds were prepared to act as a coagulant. Physical and chemical analyses were conducted on sugarcane juice, fermentate, fermentate with added moringa coagulant, and with added pulverized ceramic residues retained on sieves with mesh openings of 425 μm , 250 μm , 150 μm , and 75 μm . Tests were carried out regarding apparent color, turbidity, pH, total solids, and metals. The treated samples were also analyzed for alcohol content and BET testing.

It was observed that all treatments contributed to the clarification of the sample, with emphasis on ceramic residues RC #425 μm and RC #250 μm , which demonstrated greater efficiency in reducing turbidity and apparent color. The treatment with Moringa, although effective in impurity removal, showed the greatest increase in electrical conductivity, indicating a significant release of soluble salts. Treatments with fermentation maintained relatively stable pH and conductivity values, acting moderately on the analyzed parameters. The combination of both materials demonstrated efficiency in clarification, resulting in a cleaner fermentate with lower environmental cost. This process aligns with SDG 12 (Responsible Consumption and Production), showing itself as a promising and viable alternative for the alcoholic beverage industry and the biofuel sector.

Keywords: Clarification, Alcoholic fermentate, Ceramic roof tile waste, *Moringa oleifera* Lam. and Sustainability.

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Classificação da granulometria. Segundo ABNT-NBR 6502/95.....	29
Quadro 02 - Tipos de isothermas segundo a IUPAC.....	36
Quadro 03 - Dados da equação e do R^2 do teste da presença de metais.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 01- Dados da peneiração da granulometria, segundo ABNT-NBR 6502/95.....	41
Tabela 02 -Dados da peneiração da granulometria, % que passa da amostra total.....	42
Tabela 03 - Estimativas por interpolação da granulometria.....	43
Tabela 04 - Dados do ° Brix. (1ª amostragem).....	47
Tabela 05 - Dados do ° Brix. (2ª amostragem).....	48
Tabela 06 - Comparativo de tratamentos de clarificação média das leituras (30min e 2h30min)..	52
Tabela 07 - Comparativo de tratamentos de clarificação média das leituras (30min e 2h30min)..	57
Tabela 08 - Dados dos sólidos totais da média da primeira e da segunda fermentado.....	61
Tabela09 - Dados do teor de álcool para a primeira e a segunda amostragem.....	62
Tabela 10 - Dados dos metais.....	65
Tabela 11 - Análise do teste BET.....	68
Tabela 12 - Dados de Desorption.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fabricação do caldo de cana-de-açúcar na feira livre.....	24
Figura 2 - Instrumentos.....	26
Figura 3 - Produção do fermentado, fases da fermentação.....	27
Figura 4 - Etapas da trituração das telhas cerâmicas.....	28
Figura 5 - Conjunto de peneirador.....	28
Figura 6 - Aparelho Autoclave utilizado para o estudo.....	30
Figura 7 - Etapas para obtenção do coagulante de moringa.....	31
Figura 8 - Aparelho Jar Test utilizado para o estudo.....	33
Figura 9 - Fluxograma de análises físico-químicas.....	33
Figura 10 - Equipamento NOVA 1000e, Surface Area & Pore Size Analyzer. Quantachrome.....	36
Figura 11 - Ebuliômetro.....	37
Figura 12 - Amostras pós-estufa nas cápsulas de porcelana.....	38
Figura 13 - Abertura das amostras para o teste.....	39
Figura 14 - Dados da curva granulométrica.....	43
Figura 15 - Dados da redução da turbidez para a 1ª amostragem do caldo de cana, fermentado e tratamento.....	54
Figura 16 - Dados da redução da cor aparente para a 1ª amostragem do caldo de cana, fermentado e tratamento.....	54
Figura 17 - Dados do aumento da condutividade para a 1ª amostragem do caldo de cana, fermentado e tratamento.....	56
Figura 18 - Dados da redução da turbidez para a 2ª amostragem do caldo de cana, fermentado e tratamento.....	59
Figura 19 - Dados da redução da cor aparente para a 2ª amostragem do caldo de cana, fermentado e tratamento.....	59
Figura 20 - Dados do aumento da condutividade para a 2ª amostragem do caldo de cana, fermentado e tratamento.....	60
Figura 21 - Gráfico da Isoterma #75 µm.....	70
Figura 22 - Gráfico da Isoterma #150 µm.....	74

Figura 23 - Gráfico da Isoterma #250 μm	76
Figura 24 - Gráfico da Isoterma #425 μm	80

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABREMA- Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente

ANA- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ANCAT- Atlas Brasileiro da Reciclagem

ANVISA- Agência Nacional de Vigilância Sanitária

ATP- Adenosina Trifosfato

BET- Brunauer–Emmett–Teller

BJH- Barrett–Joyner–Halenda

CC- Coeficiente de Curvatura

CETESB- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CLMDCEM - Condomínio de Laboratórios Multiusuários do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais

CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente

CU- Coeficientes de Uniformidade

CV- Coeficiente de Variação

D₁₀- Diâmetro da partícula pelo qual 10% da massa total da amostra passa

D₃₀- Diâmetro da partícula pelo qual 30% da massa total da amostra passa

D₆₀- Diâmetro da partícula pelo qual 60% da massa total da amostra passa

DAF- Flotação por ar dissolvido

DAP- Fosfato Diamônico

DDPM- Denoising Diffusion Probabilistic Models

DQO- Demanda Química de Oxigênio

ENEQ- Encontro Nacional de Ensino de Química

ETA- Estação de Tratamento de Água

ETE- Estação de Tratamento de Esgoto

FAAS- Espectrometria de Absorção Atômica com Chama

FAO- Food and Agriculture Organization of the United Nations

GEOPAV- Laboratório de Geotecnia e Pavimentação

ICP-MS- Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado

ICP-OES- Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado

ICUMSA- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis

INFRA/UFS- Superintendência de Infraestrutura da Universidade Federal de Sergipe

IUPAC- International Union of Pure and Applied Chemistry

LABAM- Laboratório Biotecnologia Ambiental

LAMCE- Laboratório de Materiais de Construção e Estrutura

LBI- Laboratório de Bioquímica Industrial

LDCM- Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais

LTA- Laboratório de Tecnologias Alternativas

NBR- Norma Brasileira

NF- Nanofiltração

ODS- Desenvolvimento Sustentável

ONU- Organização das Nações Unidas

PAC- Programa de Aceleração do Crescimento

pH- Potenz Hydrogen

PNUD- Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PNUMA- Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

POA- Processos de Oxidação Avançada

RC- Resíduo Cerâmico

RO- Osmose Reversa

SAMA- Laboratório de Saneamento Ambiental

SIDAC- Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção

SODIS- Solar Water Disinfection

UASB- Upflow Anaerobic Sludge Blanket

UF- Ultrafiltração

UFS- Universidade Federal de Sergipe

UFSC- Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1 Fermentado alcoólico de cana-de-açúcar.....	4
3.2 Técnicas de clarificação tradicionais/avançadas.....	5
3.3 Técnicas de clarificação sustentáveis.....	7
3.3.1 Integração sustentável.....	7
3.4 Materiais sustentáveis.....	9
3.4.1 Resíduo: telha cerâmica.....	10
3.4.2 Natural: Moringa oleifera Lam.....	14
3.5 Caracterização	16
3.5.1 Ensaio de granulometria.....	16
3.5.2 Ensaio jar test.....	17
3.5.3 Teste de análises de área de superfície e volume dos resíduos da telha cerâmica.....	18
3.5.4 Teste de sólidos totais.....	20
3.5.5 Teste da presença de metais.....	20
3.5.6 Teste do teor de álcool.....	21
3.6 Parâmetros.....	22
4. METODOLOGIA	24
4.1 Preparação dos fermentados.....	24

4.2 Características dos resíduos das telhas cerâmicos	27
4.3 Ensaio de peneiramento	27
4.4 Preparação do Coagulante natural de <i>Moringa oleifera</i> Lam.	30
4.5 Caracterização.....	32
4.5.1 Teste de clarificação.....	32
4.5.2 Teste BET.....	34
4.5.3 Teste do teor de álcool.....	37
4.5.4 Teste de sólidos totais	37
4.5.5 Teste da presença de metais	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1 Estudo de granulometria.....	41
5.2 Fermentado alcoólico.....	44
5.3 Processo de clarificação.....	52
5.4 Teste de sólidos totais.....	60
5.5 Teste do teor de álcool.....	62
5.6 Teste de presença de metais.....	64
5.7 Teste BET.....	67
6. CONCLUSÕES FINAIS.....	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

1 INTRODUÇÃO

A crescente busca por alternativas na gestão de resíduos tem impulsionado estudos voltados para a reciclagem de materiais, como o vidro de cal sodada, amplamente utilizado na formulação de revestimentos cerâmicos. Contudo, até o momento não foi possível reciclar, de forma geral, percentagem desse material (mais de 20%) em nível industrial, de acordo com Rambaldi e Elisa (2021).

No entanto, desafios industriais ainda limitam a escala dessa reciclagem. Na contemporaneidade, segundo Parese *et al.* (2022) materiais e técnicas avançadas baseadas na reutilização/reciclagem estão surgindo no mercado atual, enquanto os designers precisam identificar as soluções mais viáveis para cada contexto específico. Segundo Paulino *et al.* (2023), a publicação da Resolução Conama nº 307/2002 foi um marco regulatório que impulsionou a criação de usinas recicladoras de resíduos da construção civil. De acordo com o Atlas Brasileiro da Reciclagem (ANCAT, 2023) aponta que o número de organizações formais de reciclagem aumentou, com destaque para a produtividade média por catador, que chegou a 2,2 toneladas/mês em cooperativas com equipamentos adequados. Consecutivo ao panorama dos resíduos sólidos no Brasil a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (2024) revelou que o índice de reciclagem dobrou entre 2022 e 2023, passando de 3,5% para 8%, impulsionado pela coleta seletiva e pelo trabalho dos catadores informais.

Paralelo às questões de resíduo cerâmico, na busca por padrões mais sustentáveis, têm-se estudado alternativas menos agressivas para o tratamento de resíduos como o emprego de coagulantes de origem vegetal ou mineral, a exemplo do coagulante de *Moringa oleifera* Lam.

O uso de coagulantes naturais, como o da *Moringa oleifera* Lam., tem ganhado destaque em várias áreas da engenharia ambiental, principalmente no tratamento de águas e efluentes, devido à sua eficácia e menor impacto ambiental em comparação com os coagulantes químicos convencionais. A *Moringa oleifera*, uma planta originária do norte da Índia, contém proteínas específicas em suas sementes que têm a capacidade de interagir com as partículas em suspensão na água, aglomerando-as e facilitando sua remoção. Esse processo de coagulação não só ajuda na purificação da água, mas também é mais acessível e sustentável em comparação com o uso de produtos químicos como o sulfato de alumínio, que podem causar efeitos adversos à saúde e ao meio ambiente (Kiguel *et al.*, 2019; Ocheja *et al.*, 2020).

Ao pensar que, seja o uso de resíduos cerâmicos ou a aplicação de moringa, podem auxiliar no processo de clarificação de fermentado, observou-se que a clarificação do fermentado alcoólico é uma etapa essencial para garantir a qualidade do produto final, removendo sólidos em suspensão, resíduos de leveduras e compostos que podem causar turbidez e alterações sensoriais. Esse processo não apenas melhora a transparência e estabilidade da bebida, como também evita defeitos de sabor e prolonga sua vida útil (Silva *et al.*, 2021). Segundo Costa *et al.* (2020), a clarificação é fundamental para a padronização do produto, especialmente em bebidas fermentadas de origem vegetal, como o caldo de cana-de-açúcar.

As cidades como Laranjeiras e Japaratuba, em Sergipe, adaptaram suas estruturas urbanas para atender à dinâmica dos empreendimentos sucroalcooleiros, atividade que tem gerado impactos ambientais e sociais relevantes. Na região do Baixo São Francisco, a expansão das plantações foi notável: em apenas dez anos, Neópolis registrou crescimento de 1.882%, Japoatã de 1.262% e Pacatuba apresentou um aumento surpreendente de 125.000%, segundo dados do Observatório de Sergipe (2023). Assim, pelo fato da bebida ser considerada de baixo custo, buscou-se classificá-la como materiais considerados também acessíveis.

Assim, com o intuito de contribuir para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e também no processo de clarificação do fermentado, o presente trabalho teve como proposta estudar a clarificação de fermentado alcoólico por meio tanto de resíduos de telhas cerâmicas quanto através da *Moringa oleifera* Lam.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Clarificar o fermentado alcoólico de cana-de-açúcar por meio de resíduos de telhas cerâmicas e a *Moringa oleifera* Lam.

2.2 Objetivos específicos

- Aplicar a *Moringa oleifera* Lam. como alternativa clarificante;
- Apresentar o uso de resíduos de telhas cerâmicas como meio clarificante e material potencialmente adsorvente;
- Comparar a eficiência na clarificação do fermentado alcoólico de cana-de-açúcar para o uso da *Moringa oleifera* Lam. e resíduos de telhas cerâmicas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Fermentado alcoólico de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é a principal matéria-prima utilizada na produção de etanol no Brasil, sendo amplamente cultivada devido à sua elevada concentração de sacarose, o que favorece o processo fermentativo. Segundo Embrapa (2022), o caldo extraído da cana passa por tratamentos térmicos e correções de pH antes de ser fermentado por leveduras do gênero *Saccharomyces*, especialmente *S. cerevisiae*, que convertem os açúcares em etanol e dióxido de carbono. Esse processo ocorre em condições anaeróbicas e é influenciado por fatores como temperatura, acidez e concentração de açúcares, os quais impactam diretamente na produtividade e eficiência da fermentação (Zambelli; Januário, 2016). A escolha adequada da variedade da cana, o preparo do mosto e o controle microbiológico são essenciais para evitar contaminações e garantir altos rendimentos alcoólicos, de acordo com Amaral (2022). Assim, a cana-de-açúcar não apenas fornece os substratos necessários para a fermentação, como também determina a qualidade e o desempenho do processo industrial.

Segundo Góes-Favoni *et al.* (2018), a fermentação alcoólica é uma reação química que acontece em ambiente livre de oxigênio (anaeróbico), na qual, açúcares são convertidos em etanol (C_2H_6O) e gás carbônico (CO_2), sob ação de enzimas específicas. Essa transformação ocorre no citoplasma das leveduras, como a *Saccharomyces cerevisiae*, e tem como principal finalidade a geração de energia na forma de Adenosina Trifosfato (ATP), essencial para funções vitais como crescimento e reprodução. O etanol gerado é, na prática, um subproduto dessa rota metabólica, mas sua presença também serve como estratégia de defesa, ao inibir microrganismos concorrentes no mesmo ambiente.

Essa ação antimicrobiana ocorre por meio da desnaturação de proteínas e da dissolução de lipídios presentes nas membranas celulares, comprometendo funções vitais dos microrganismos de acordo com a RDC nº 31 Agência de Vigilância Sanitária (2010). Segundo Bernardi e Costa (2017) diversos grupos são afetados, como bactérias Gram-positivas e Gram-negativas, fungos não fermentativos, leveduras selvagens e bactérias lácticas, que apresentam menor tolerância ao etanol em concentrações superiores a 10%. Essa seletividade favorece o domínio das leveduras desejadas no meio fermentativo, garantindo maior eficiência e estabilidade do processo. Além disso, o etanol possui propriedades microbicidas reconhecidas, sendo amplamente utilizado como

desinfetante em ambientes hospitalares e industriais de acordo com a FIOCRUZ (2010). Portanto, sua presença no meio fermentativo não apenas contribui para a produção de energia celular, mas também desempenha papel estratégico na supressão de microrganismos indesejados, assegurando a qualidade microbiológica do produto final. De acordo com a Embrapa (2022), para avaliar a qualidade de uma fermentação alcoólica, os indicadores mais relevantes são a produtividade e a eficiência do processo. Esses dois parâmetros refletem, de maneira indireta, fatores cruciais como a temperatura aplicada, a duração da fermentação e a quantidade de açúcares que permanecem no meio após o término da reação, de acordo com Zarpelon (2020).

3.2 Técnicas de clarificação tradicionais e avançadas

A clarificação é uma etapa fundamental nos processos de tratamento de líquidos industriais e alimentares, como sucos, vinhos, cervejas e, especialmente, no setor sucroalcooleiro. Seu objetivo é remover impurezas físicas, químicas e microbiológicas, garantindo maior estabilidade e qualidade ao produto final. Segundo Digital Water (2024), a clarificação eficiente contribui para a redução de turbidez, melhora da aparência e otimização das etapas subsequentes, como fermentação e destilação.

Segundo Univiçosa (2024) e Porvoo (2025) as técnicas tradicionais incluem processos como decantação, filtração e centrifugação, que são amplamente utilizadas por sua simplicidade e baixo custo. Já as técnicas avançadas incorporam flotação por ar dissolvido (DAF), clarifloculadores hidrodinâmicos, membranas de filtração Ultrafiltração (UF), Nanofiltração (NF), Osmose Reversa (RO) e Processos de Oxidação Avançada (POA), como ozonização e UV/H₂O₂, que oferecem maior seletividade e eficiência na remoção de partículas coloidais e contaminantes emergentes.

Além disso, tecnologias como inteligência artificial e monitoramento em tempo real estão sendo integradas aos sistemas de clarificação, permitindo ajustes automáticos e maior controle da qualidade da água ou do caldo clarificado, de acordo com Porvoo (2025). A escolha da técnica ideal depende de fatores como tipo de matéria-prima, volume de produção, parâmetros físico-químicos e objetivos tecnológicos do processo.

As técnicas de clarificação tradicionais continuam sendo amplamente utilizadas em estações de tratamento de água (ETAs) e na indústria alimentícia, devido à sua eficácia, simplicidade operacional e baixo custo. Elas visam remover partículas em suspensão, turbidez e

matéria orgânica, garantindo maior qualidade ao líquido tratado, são essas:

Coagulação e Floculação: A coagulação consiste na adição de coagulantes químicos, como sulfato de alumínio ou cloreto férrico, que neutralizam as cargas elétricas das partículas coloidais, promovendo sua aglutinação. A floculação, etapa subsequente, envolve a agitação lenta da água para favorecer o crescimento dos flocos. Segundo Kurita (2025), o uso de polímeros catiônicos e aniônicos como auxiliares de floculação tem aumentado a eficiência do processo, reduzindo o consumo de coagulantes e melhorando a sedimentação dos flocos.

Decantação: Após a floculação, os flocos formados sedimentam por ação da gravidade. A decantação é uma etapa física essencial para separar os sólidos do líquido. De acordo com SOE Perfis (2025), o uso de módulos lamelares e perfis decantadores têm otimizado o processo, permitindo maior eficiência em menor espaço e tempo de residência.

Filtração: A filtração complementa a clarificação ao remover partículas remanescentes. Os filtros podem utilizar meios como areia de sílica, carvão ativado ou antracito. Conforme Digital Water (2024), os sistemas de filtração modernos incorporam camadas mistas e filtros de fluxo ascendente, que aumentam a taxa de remoção de impurezas e reduzem a necessidade de retrolavagem.

Teste de Jarros (Jar Test): O teste de jarros é uma técnica laboratorial essencial para determinar a dosagem ideal de coagulantes e o tempo de floculação. Ele simula o processo em escala reduzida, permitindo ajustes precisos antes da aplicação em larga escala. Segundo Fusati (2025), o Jar Test contribui para a redução de custos operacionais, melhora da eficiência e conformidade ambiental, sendo indispensável para ETAs e ETEs.

As técnicas avançadas de clarificação têm ganhado destaque por oferecerem maior eficiência, menor impacto ambiental e melhor qualidade do produto final. A seguir, são descritas abordagens modernas com base em estudos recentes:

Uso de Polímeros Sintéticos: Poliacrilamidas aniônicas e catiônicas continuam sendo amplamente utilizadas como auxiliares de floculação. Estudos recentes demonstram que essas moléculas de alto peso molecular promovem a formação de pontes entre partículas, aumentando a eficiência da remoção de sólidos mesmo em baixas dosagens (Almawatech, 2024; Tavares, 2023). A maior fabricante mundial de poliacrilamidas, tem investido em formulações sustentáveis para atender às exigências ambientais atuais de acordo com SNF Brasil (2025).

Clarificação por Ultrassom: A aplicação de ondas ultrassônicas tem sido estudada como técnica

promissora para desestabilizar partículas coloidais e melhorar a formação de flocos. Em 2025, pesquisadores demonstraram que o uso de modelos probabilísticos de difusão (DDPMs) aplicados a imagens de ultrassom pode melhorar significativamente a qualidade da clarificação em tempo real, de acordo com Scisimple (2025).

Radiação com Elétrons Acelerados: Embora ainda em fase experimental, a radiação com elétrons acelerados tem mostrado resultados positivos na clarificação de caldo de cana, especialmente na redução da cor *International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis* (ICUMSA) sem uso de compostos sulfurosos. Estudos recentes indicam que essa técnica pode ser integrada a processos industriais com controle preciso de dosagem energética, de acordo com Scisimple (2025).

Flotação por Ar Dissolvido (DAF): A DAF continua sendo uma das técnicas mais eficazes para remoção de partículas de baixa densidade. Em 2025, a Fluence e a Fast Tecnologia Industrial destacaram melhorias no sistema de microbolhas e na automação do processo, permitindo maior eficiência e menor consumo de produtos químicos, de acordo com Fluence (2025) e Fast (2025).

Membranas de Ultrafiltração: As membranas de ultrafiltração (UF) têm se consolidado como barreiras físicas altamente seletivas. A Toray Industries desenvolveu em 2025 uma membrana de alta remoção que reduz em mais de 30% as emissões de CO₂ e melhora a eficiência da osmose reversa, (Toray, 2025). Segundo a Veolia (2025) também lançou sistemas modulares com membranas ZeeWeed, ideais para aplicações industriais e municipais.

3.3 Técnicas de clarificação sustentáveis

Segundo Tagliassachi *et al.* (2021), a clarificação é um procedimento aplicado para remover impurezas e partículas presentes, tanto em suspensão quanto dissolvidas, em um líquido. O resultado desejado é obter uma solução visualmente limpa e transparente, com aspecto brilhante.

3.3.1 Integração sustentável

A combinação da *Moringa oleifera* Lam. e o resíduo cerâmico representa uma solução híbrida, onde o coagulante natural atua na formação de flocos e o resíduo cerâmico contribui para a adsorção de impurezas e estabilização do processo. Essa sinergia pode resultar em:

- Redução de custos operacionais;

- Menor geração de lodo residual;
- Maior eficiência na remoção de turbidez e cor;
- Aplicabilidade em comunidades rurais e sistemas descentralizados.

A *Moringa oleifera* Lam., rica em proteínas catiônicas, atua como coagulante natural, promovendo a formação de flocos por neutralização de cargas negativas de partículas suspensas. Estudos como o de Ribeiro *et al.* (2024) demonstram que dosagens de 200 mg/200 mL são eficazes na remoção de turbidez e cor, sem alterar o pH da água.

As proteínas presentes nas sementes de *Moringa oleifera* possuem carga positiva em pH neutro, o que lhes permite interagir com partículas coloidais carregadas negativamente, como argilas, matéria orgânica e microrganismos. Esse comportamento é atribuído à presença de proteínas catiônicas de baixo peso molecular, que atuam como agentes coagulantes naturais (Migallão *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2021).

O processo de coagulação ocorre por meio de três mecanismos principais:

- **Neutralização de cargas:** As proteínas reduzem o potencial zeta das partículas, promovendo instabilidade coloidal e facilitando a agregação (Ribeiro *et al.*, 2024).
- **Adsorção e ponteameto:** As proteínas formam pontes entre partículas suspensas, favorecendo a formação de flocos maiores (Silva *et al.*, 2021).
- **Formação de flocos:** Os agregados tornam-se suficientemente grandes para sedimentar por ação da gravidade, permitindo a separação física da fase sólida da líquida (Migallão *et al.*, 2006).

Esse mecanismo é semelhante ao dos coagulantes químicos, como o sulfato de alumínio, amplamente utilizado em estações de tratamento de água. No entanto, diferentemente dos sais de alumínio, a *Moringa oleifera* apresenta menor impacto ambiental, baixa toxicidade e não gera lodo químico recalcitrante, o que reduz os riscos de contaminação secundária e bioacumulação de metais (Silva; Oliveira, 2020; Santos *et al.*, 2022).

O resíduo cerâmico, quando ativado com ácido sulfúrico, adquire propriedades adsorventes que favorecem a remoção de compostos orgânicos e coloridos. Patrício *et al.* (2014) já indicavam seu uso em clarificação de óleos vegetais, e pesquisas recentes ampliam sua aplicação para águas residuais e efluentes industriais.

O uso de resíduo cerâmico na clarificação é um processo chamado de colagem, que consiste em adicionar uma substância de agente de colagem ao fermentado para remover as

partículas suspensas que podem causar turvação, alteração de cor ou sabor. Segundo Patrício *et al.* (2014), nos processos de clarificação de óleos vegetais, é comum a realização de uma etapa de ativação utilizando ácidos minerais, sendo o ácido sulfúrico o mais empregado. Essa técnica não se limita apenas ao setor alimentício; ela também é amplamente aplicada em diversas indústrias, como a de tintas e vernizes, cosméticos, fluidos tixotrópicos voltados para perfuração de poços e materiais desenvolvidos para adsorver metais pesados, entre outros.

No contexto brasileiro, os impactos ambientais mais específicos gerados pelos descartes de resíduos cerâmicos são a contaminação do solo e da água, comprometendo a qualidade dos recursos hídricos e afetando a saúde humana e a vida selvagem (Matos *et al.*, 2011). Segundo a Como Descartar (2025), o descarte de telhas cerâmicas no Brasil é significativo, considerando que o país produz mais de 100 milhões de toneladas de cerâmicas vermelhas anualmente. Embora a reciclagem de telhas cerâmicas não seja comum, elas podem ser reaproveitadas em cimentos como o cimento Portland, ou utilizadas em projetos de construção sustentável, no entanto, a reciclagem desse material ainda não é amplamente praticada devido à complexidade e ao custo do processo. Além disso, os resíduos da construção civil, incluindo telhas cerâmicas, somaram 45 mil toneladas em 2022, de acordo com a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente - ABREMA (2024).

3.4 Materiais sustentáveis

A utilização de materiais sustentáveis, especialmente os de origem natural, tem se tornado uma estratégia essencial para mitigar os impactos ambientais da produção industrial e promover práticas mais responsáveis. Esses materiais, como fibras vegetais, resíduos agroindustriais, argilas, biomassa e coagulantes naturais, apresentam baixo impacto ambiental, são renováveis e muitas vezes biodegradáveis, contribuindo para a redução da poluição e da geração de resíduos sólidos.

Segundo a Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC), instituída pelo Decreto nº 12.082/2024, o Brasil tem adotado medidas para substituir o modelo linear de produção — baseado em “extrair-produzir-descartar” — por um modelo circular, que prioriza o reúso, a reciclagem e a regeneração dos recursos naturais (BRASIL, 2024). Essa transição está diretamente alinhada ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável nº 12 (ODS 12), que visa assegurar padrões de consumo e produção sustentáveis, promovendo o uso eficiente dos recursos

e a redução substancial da geração de resíduos até 2030 (IPEA, 2024).

A economia circular é definida como um sistema produtivo que mantém o fluxo contínuo de materiais e energia, prolongando o ciclo de vida dos produtos e evitando o descarte prematuro. Isso inclui ações como o reaproveitamento de resíduos, a valorização de subprodutos e a incorporação de materiais naturais em processos industriais. Segundo Vaz (2023), o uso de carbono renovável proveniente de biomassa e materiais recicláveis é uma das principais estratégias para viabilizar cadeias de valor sustentáveis e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Portanto, a adoção de materiais sustentáveis e naturais não apenas contribui para a preservação ambiental, mas também fortalece a inclusão social, a inovação tecnológica e a resiliência econômica, especialmente em comunidades vulneráveis e sistemas descentralizados.

3.4.1 Resíduo: telha cerâmica

A Escola de Engenharia (2024) afirma que as telhas são elementos usados para cobrir as edificações, protegendo-as das intempéries, como chuva, sol, vento e calor. Existem diferentes tipos de telhas, como as de cerâmica, as de concreto, as de aço, as de fibrocimento e as ecológicas. Cada tipo de telha tem suas vantagens e desvantagens, dependendo do custo, da durabilidade, da estética e do desempenho térmico e acústico.

Os resíduos para a construção civil são os materiais descartados nas obras, como tijolos, blocos, concreto, argamassa, gesso, madeira, vidro, plástico, metal, papel etc. Esses resíduos podem causar impactos ambientais negativos, se não forem gerenciados e destinados adequadamente (Escola de Engenharia, 2024). Por isso, é importante fazer a separação, a coleta, o transporte, o tratamento e a reciclagem dos resíduos, seguindo as normas e as legislações vigentes. A reciclagem dos resíduos para a construção civil consiste em transformar os materiais descartados em novos produtos, que podem ser usados na própria obra ou em outras aplicações. A reciclagem traz benefícios econômicos, sociais e ambientais, como a redução de custos, a geração de empregos, a preservação de recursos naturais e a diminuição da poluição, ainda de acordo com informações da Escola de Engenharia (2024), alguns exemplos de reciclagem de telhas e resíduos para a construção civil são:

- Telhas e blocos de cerâmica quebrados podem ser usados para substituir parte da brita na produção de concreto;

- Restos de blocos e de vidros podem ser destinados à produção de asfalto;
- Papéis, plásticos e papelões devem ser reciclados em usinas específicas;
- Telhas ecológicas podem ser feitas com tubos de pasta de dente, que são leves, resistentes, baratas e recicláveis.

As telhas cerâmicas são componentes utilizados na cobertura de edificações, com a função de garantir estanqueidade à água e proteção contra intempéries. De acordo com a NBR 15310 (ABNT, 2009), são peças moldadas e queimadas, geralmente compostas por argilas naturais, que podem apresentar formas côncavas ou planas, com encaixes, pinos ou furos de amarração para fixação na estrutura de apoio. Ainda sobre a composição química e mineralógica da telha influencia diretamente sua resistência mecânica, impermeabilidade e durabilidade de acordo com a NBR 15310 (ABNT, 2009).

A matéria-prima principal para a fabricação dessas telhas é a argila vermelha, um material de origem sedimentar, formado pela decomposição de rochas feldspáticas. Essa argila apresenta coloração avermelhada devido à presença de óxidos de ferro, como hematita e goethita, e é amplamente utilizada na indústria da construção civil para a produção de cerâmicas estruturais, como blocos, telhas, tijolos e pisos (Mineralex, 2025). Sua formação heterogênea depende da caracterização geológica da jazida e do processo de extração, o que influencia diretamente suas propriedades tecnológicas. As principais propriedades que determinam a qualidade da argila vermelha para uso cerâmico são:

- **Granulometria:** afeta a densidade e a resistência do produto final (Ribeiro *et al.* 2022);
- **Plasticidade:** essencial para a moldagem das peças cerâmicas (Falcão *et al.* 2023);
- **Composição química:** presença de minerais como quartzo, feldspato, mica e óxidos metálicos que influenciam a cor e o comportamento térmico da cerâmica, de acordo com o Estudo da Universidade Federal de Campina Grande (2023).

Segundo ArchDaily (2022), quando submetida a altas temperaturas, a argila vermelha adquire resistência mecânica e se torna excelente isolante térmico e acústico, características valorizadas na construção civil moderna. Consecutivo SEBRAE (2023), no contexto da grande demanda existente pelos produtos cerâmicos, e levando em conta fatores como a preservação dos recursos naturais, bem como o custo de produção, torna-se urgente repensar a produção considerando as condições de cada região: os recursos disponíveis, as possibilidades de reaproveitamento de matéria-prima proveniente de indústrias e o uso adequado de bens e

serviços, tendo em vista a economia dos materiais primários de maior valor comercial e a sua substituição total ou parcial por subprodutos industriais.

Segundo Reis *et al.* (2014) argilominerais são formados por processo geológico de decomposição de feldspatos, a caulinita é o argilomineral mais recorrente e caracteriza-se por uma estrutura do tipo 1:1, formada por camadas intercaladas de silicatos — especificamente $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$ — e grupos hidroxilados de alumínio — $[\text{Al}_2(\text{OH})_4]^{2+}$. Sua composição química teórica é representada por $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, embora também seja comum a notação simplificada $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Segundo Geology Science (2023), os minerais do grupo das esmectitas pertencem aos filossilicatos e apresentam estrutura do tipo 2:1 (T-O-T), composta por duas lâminas tetraédricas de sílica envolvendo uma lâmina octaédrica de alumínio ou magnésio. Essa configuração permite a presença de cátions hidratados e moléculas de água no espaço interlamelar, conferindo alta expansibilidade e capacidade de troca catiônica. A substituição isomórfica ocorre com frequência: o Al^{3+} pode ser substituído por Mg^{2+} ou Fe^{2+} na camada octaédrica, enquanto o Si^{4+} pode ser parcialmente substituído por Al^{3+} na camada tetraédrica, gerando cargas negativas compensadas por cátions como Na^+ , Ca^{2+} e K^+ (UFJF, 2023).

Já os minerais do grupo das micas, como muscovita e biotita, também apresentam estrutura T-O-T, mas com ligações interlamelares mais fortes, devido à presença de cátions monovalentes como K^+ entre as lâminas tetraédricas. Isso torna as micas não expansivas, com baixa capacidade de absorção de água. Segundo Museu Heinz Ebert (2023), “a substituição isomórfica nas micas ocorre de forma parcial, com Al^{3+} substituindo Si^{4+} nas lâminas tetraédricas, gerando cargas negativas compensadas por cátions fixos, o que garante a estabilidade da estrutura”.

Segundo (eCycle, 2024), as argilas são compostas por dióxido de silício (SiO_2) e uma combinação de diversos minerais, como quartzo, carbonatos, óxidos de alumínio e de ferro. A proporção entre esses elementos, especialmente o SiO_2 , é o que define o tipo específico de argila. Com o passar do tempo, o processo de intemperismo favorece a remoção de minerais solúveis, como sódio, potássio, cálcio e carbonato. Em contrapartida, os óxidos de ferro e alumínio apresentam maior estabilidade e resistem mais à lixiviação. Por isso, depósitos de argila profundamente intemperizados tendem a concentrar esses óxidos, resultando no conhecido barro vermelho. Como a argila possui forte afinidade por moléculas de água, a mistura dos dois gera

uma massa moldável que, após ser seca e levada ao forno, transforma-se em cerâmica. No entanto, devido ao ferro presente, esse tipo de argila funde em temperaturas mais baixas, o que compromete a resistência do material final — restringindo seu uso à fabricação de peças como tijolos e telhas.

Segundo Walter *et al.* (2021), na indústria, as principais matérias-primas utilizadas são argilas plásticas do tipo caulínico-ilítico, formadas predominantemente por argilominerais silicatos hidratados de alumínio, além de óxidos e hidróxidos de ferro, compostos orgânicos e alumínio. Esses materiais costumam ser extraídos de ambientes naturais úmidos, como margens de rios, áreas lacustres e regiões de várzea.

Conforme Domingui *et al.* (2014), durante a fabricação industrial de produtos cerâmicos, como pisos, azulejos e blocos estruturais de cerâmica vermelha, ocorre a geração de resíduos provenientes de quebras ou falhas no processo produtivo. Embora parte desses rejeitos possa ser reincorporada à própria produção, uma quantidade significativa acaba sendo descartada como resíduo sólido, frequentemente destinado a aterros. Apesar do volume gerado, esses materiais ainda são pouco explorados na literatura científica quanto ao seu potencial como adsorventes para remoção de corantes. As telhas cerâmicas apresentam alta estabilidade química, sendo resistentes à ação de ácidos fracos, sais atmosféricos e agentes biológicos. Após a sinterização, os óxidos metálicos presentes tornam-se estáveis, conferindo ao material:

- Baixa reatividade química;
- Resistência à intempérie;
- Durabilidade em ambientes agressivos.

Segundo Vieira e Emiliano (2013), a presença de óxidos como Fe_2O_3 , CaO , MgO e Na_2O influencia diretamente a fusibilidade, a cor e a resistência mecânica das telhas.

A granulometria dos resíduos cerâmicos pode ser ajustada conforme a NBR 7181 (ABNT, 2025), permitindo sua classificação em frações como pedregulho, areia, silte e argila. Essa caracterização é essencial para avaliar sua aplicabilidade como agregado reciclado ou como suporte em processos físico-químicos.

Estudos recentes reforçam o potencial sustentável desses resíduos:

- Dias (2004) avaliou o uso de resíduos de telhas cerâmicas em camadas de pavimentos de baixo custo, demonstrando viabilidade técnica e econômica ao misturá-los com solos lateríticos.

- Bezerra (2014) desenvolveu corpos cerâmicos ativados alcalinamente com resíduos de cerâmica vermelha, destacando sua durabilidade e resistência mecânica.
- Silva (2019) propôs um plano de gerenciamento de resíduos sólidos na indústria cerâmica, evidenciando a necessidade de regulamentação técnica e reaproveitamento dos resíduos.
- Alves et al. (2025) realizaram uma revisão sistemática sobre a incorporação de resíduos cerâmicos em materiais da construção civil, apontando compatibilidade química e desempenho mecânico satisfatório.

Além disso, o relatório técnico do SIDAC (2022) apresenta dados ambientais e de ciclo de vida dos resíduos cerâmicos, reforçando sua viabilidade como matéria-prima alternativa e alinhamento com práticas de economia circular.

Segundo a NBR 15310 (ABNT, 2009), telhas cerâmicas são componentes conformados por extrusão ou prensagem, compostos majoritariamente por argilas plásticas e queimados a temperaturas entre 850 °C e 1050 °C. Os resíduos dessas telhas mantêm características como alta porosidade, baixa densidade aparente, resistência mecânica moderada e absorção de água variável, dependendo do tipo de argila e do ciclo térmico aplicado.

Estudos como os de Bezerra (2014) e Alves *et al.* (2025) demonstram que os resíduos de telhas cerâmicas podem ser reutilizados em:

- Pavimentação de baixo custo;
- Argamassas e concretos não estruturais;
- Processos de clarificação e filtração;
- Produção de geopolímeros e cerâmicas técnicas.

3.4.2 Natural: *Moringa oleifera* Lam.

A *Moringa oleifera* Lam. é uma espécie arbórea originária do noroeste da Índia, pertencente à família Moringaceae, amplamente cultivada em regiões tropicais como Egito, Filipinas, Ceilão, Tailândia, Malásia, Paquistão, Nigéria e Brasil de acordo com Silva *et al.* (2019). Seu uso tradicional remonta a mais de dois milênios, sendo empregada por civilizações asiáticas e africanas como planta medicinal, cosmética e alimentícia. Segundo Teixeira *et al.* (2023), “a moringa é considerada uma planta de múltiplos usos, com registros históricos de aplicação como protetor solar natural, ingrediente de loções e perfumes, além de fonte de óleo comestível e terapêutico”.

Estudos recentes destacam que o óleo extraído das sementes era utilizado por gregos e romanos como condimento culinário e base para fragrâncias, devido à sua estabilidade oxidativa e aroma suave (Santos *et al.*, 2024). Além disso, a moringa tem sido reconhecida como uma planta de alto valor nutricional e medicinal, sendo chamada de “árvore da vida” por suas propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e antimicrobianas de acordo com (Rolim *et al.*, 2023).

Segundo Marques *et al.* (2025), o uso de sementes de *Moringa oleifera* Lam. no tratamento de água em comunidades rurais representa alternativa eficaz e sustentável, especialmente em regiões com infraestrutura limitada. Os autores destacam que “a semente de *Moringa oleifera* Lam. se destaca por sua disponibilidade, fácil manuseio e eficácia comprovada, sendo viável para aplicação em sistemas descentralizados com equipamentos simples e de baixo custo”

Segundo Lino *et al.* (2020), pesquisas vêm explorando o uso de coagulantes naturais como alternativa para a purificação da água, e as sementes de *Moringa oleifera* Lam. desempenham papel promissor nesse contexto. Ricas em proteínas solúveis com carga elétrica positiva, essas sementes, quando trituradas e adicionadas à água não tratada, promovem a atração de partículas negativamente carregadas — como argilas e contaminantes — funcionando como agentes floculantes naturais e eficientes.

Segundo Freire (2017), os resultados obtidos ao longo da pesquisa evidenciaram que a aplicação do extrato de sementes de *Moringa oleifera* Lam., em associação com um coagulante natural, mostrou-se eficaz na melhoria da qualidade da água. Combinado à técnica de filtração lenta por meio de filtros de barro e à desinfecção solar conhecida como *Solar Water Disinfection* (SODIS), observou-se redução expressiva nos parâmetros físico-químicos e microbiológicos monitorados.

Com base em estudos mais recentes, a eficácia do extrato de sementes de *Moringa oleifera* Lam. como coagulante natural no tratamento de esgoto sanitário continua sendo validada e aprimorada. Um exemplo é o trabalho de Alves (2023), que comparou o desempenho da moringa com o sulfato de alumínio em testes de jarros. O estudo demonstrou que a moringa apresentou remoção de turbidez superior a 70% e remoção de cor aparente próxima a 91%, com menor impacto sobre o pH e menor geração de lodo residual, reforçando sua viabilidade como alternativa sustentável.

Além disso, em Serejo *et al.* (2024) avaliaram o uso do extrato salino de moringa em reatores *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), o Reator Anaeróbio de Manta de Lodo de Fluxo Ascendente e observaram melhor desempenho na remoção de coliformes totais (86%) e *Escherichia coli* (76%), embora a remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e turbidez tenha sido inferior em alguns cenários. Esses resultados indicam que o tipo de preparo do extrato (com sal ou base como Ca(OH)_2 pode influenciar significativamente a eficiência do processo, especialmente em águas com diferentes cargas orgânicas.

3.5 Caracterização

O ensaio de tratabilidade é uma etapa fundamental na caracterização de líquidos, utilizada para avaliar a viabilidade e a eficiência de processos de tratamento físico-químico. Ele permite simular, em escala laboratorial, as condições reais de operação de uma estação de tratamento, otimizando parâmetros como tipo e dosagem de coagulantes, tempo de floculação, pH ideal e velocidade de sedimentação (Tega, 2017; Teknano, 2025). Essas normas são aplicadas especialmente quando o ensaio envolve materiais como mantas geotêxteis em leitos de drenagem ou secagem, como no tratamento de lodo de ETA's (ABES, 2025). Outros ensaios podem ser citados. A de exemplos de ensaios de granulometria realizados em solos ou testes sensíveis para determinação de composição.

3.5.1 Ensaio de granulometria

O ensaio de granulometria é um procedimento laboratorial essencial para determinar a distribuição do tamanho das partículas de um solo ou agregado, sendo fundamental para sua classificação e para prever seu comportamento em obras de engenharia civil (UFBA, 2018). O objetivo principal do ensaio é quantificar a porcentagem em massa de partículas que se encontram em diferentes faixas granulométricas, permitindo a construção da curva de distribuição granulométrica (DNER, 1994), substituída pela nova norma do DNIT 459/2025 – ME: Solos – Análise granulométrica – Método de ensaio.

O ensaio pode ser realizado por dois principais métodos principais:

- Peneiramento: utilizado para partículas maiores que 0,075 mm (areias e pedregulhos). A amostra seca é passada por uma série de peneiras com aberturas padronizadas, e a massa retida em cada peneira é pesada, de acordo com NBR 7181 (ABNT, 2025). Além disso, o

DNIT publicou em outubro de 2024 a norma DNIT 453 (2024) que especifica as condições exigíveis para peneiras de malhas quadradas usadas na análise granulométrica de solos e agregados;

- Sedimentação: aplicado para partículas menores que 0,075 mm (siltes e argilas). Baseia-se na Lei de Stokes, que relaciona o tempo de queda das partículas em suspensão com seu diâmetro (PUC Goiás, 2022).

Para realizar o ensaio, faz-se necessário passar pelas etapas, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2025):

Preparação da Amostra

- A amostra é seca e pesada;
- Remove-se impurezas e umidade excessiva, com auxílio da estufa;
- A quantidade varia conforme o tipo de solo (argiloso, arenoso, pedregulhoso).

Peneiramento

- Utiliza-se um conjunto de peneiras com aberturas decrescentes;
- A amostra é colocada na peneira superior e agitada (manual ou mecanicamente);
- Cada fração retida é pesada para calcular a porcentagem de partículas em cada faixa de tamanho.

Como respostas do ensaio, os dados obtidos são usados para traçar a curva granulométrica, da qual se extraem parâmetros como, obtém-se o diâmetro efetivo (10% das partículas são menores) denominado de D_{10} , coeficiente de uniformidade (C_u) e coeficiente de curvatura (C_c). Esses parâmetros ajudam a classificar o solo ou grão como bem ou mal graduado (Engenharia Civil FSP, 2013).

3.5.2 Ensaio jar test

O ensaio Jar Test é um método laboratorial amplamente utilizado para simular os processos de coagulação e floculação em sistemas de tratamento de água e efluentes. Ele permite determinar a dosagem ideal de coagulantes, o pH ótimo, o tempo de mistura e a eficiência de remoção de turbidez e cor (Pivokonsky *et al.*, 2022). O principal objetivo do Jar Test é avaliar o desempenho de diferentes coagulantes e suas concentrações, em condições controladas, antes da aplicação em escala real, de acordo com Santos (2011).

Esse tipo de ensaio é comumente realizado por meio do equipamento Jar Test, que consiste em agitar amostras de água ou efluente em frascos com diferentes concentrações de reagentes, observando a formação de flocos e a clarificação do líquido. Os resultados obtidos orientam o dimensionamento de sistemas de tratamento, seja para descarte seguro ou reuso da água tratada (Projeto Ambiental, 2025).

O ensaio é realizado em um equipamento com múltiplos jarros (geralmente 4 a 6), onde são adicionadas amostras iguais de água bruta. Em cada jarro, aplica-se uma dosagem diferente de coagulante, seguindo as etapas:

1. Mistura rápida (coagulação): agitação intensa por 1 a 2 minutos para dispersar o coagulante (UFSC, 2013);
2. Mistura lenta (floculação): agitação suave por 15 a 30 minutos para formação de flocos (UNESP, 2018);
3. Sedimentação: repouso por 30 a 60 minutos para decantação dos flocos;
4. Análise: medição da turbidez, cor e pH da água clarificada.

Normalmente são avaliados os parâmetros:

- Tipo e concentração do coagulante (ex: sulfato de alumínio, PAC, cloreto férrico);
- pH da água durante a coagulação;
- Eficiência de remoção de turbidez e cor;
- Formação e estabilidade dos flocos.

Quanto às aplicações o Jar Test é essencial para:

- Projetos de estações de tratamento de água (ETA);
- Avaliação de substituição de coagulantes;
- Otimização de processos em estações existentes;
- Estudos comparativos entre coagulantes naturais e sintéticos de acordo com FUSATI (2023).

3.5.3 Teste de análises de área de superfície e volume dos resíduos da telha cerâmica

A caracterização físico-química de resíduos cerâmicos é fundamental para avaliar seu potencial de reaproveitamento em aplicações industriais e ambientais. Dentre os métodos disponíveis, a análise de área de superfície específica e volume de poros por adsorção de gás é amplamente utilizada para materiais porosos. Essa técnica fornece informações sobre a estrutura

interna do material, influenciando diretamente propriedades como reatividade, capacidade de adsorção e desempenho em processos catalíticos ou de filtração de acordo com a ISO 9277 (2010) e ASTM D3663 (2020).

O método Brunauer, Emmett e Teller (BET) é o mais comum para esse tipo de análise. Ele se baseia na adsorção física de moléculas de gás — geralmente nitrogênio (N_2) — sobre a superfície do sólido a uma temperatura de 77 K. A quantidade de gás adsorvida é correlacionada com a área superficial disponível, permitindo o cálculo da área específica em m^2/g (Quantachrome, [s.d.]).

A presença de mesoporos (2–50 nm) é predominante em materiais cerâmicos, sendo responsável por grande parte da área superficial acessível. A caracterização por adsorção de gás está alinhada com normas técnicas como a *International Organization For Standardization*. ISO 9277 (2010) – Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption – BET method. Geneva (2010) e *Standard Test Method for Surface Area of Catalysts and Catalyst Carriers* (2020), que garantem a padronização dos procedimentos e a comparabilidade dos resultados.

A adsorção é um fenômeno físico-químico amplamente utilizado na caracterização de materiais porosos, como os detritos cerâmicos provenientes da indústria de telhas. Essa técnica permite avaliar a área superficial específica, o volume de poros e a afinidade entre o adsorbato e o adsorvente, sendo essencial para aplicações em filtração, catálise e reaproveitamento de resíduos (Milhomem, 2021).

O modelo de Langmuir considera a superfície homogênea com sítios de adsorção equivalentes, onde ocorre formação de uma monocamada de adsorbato. A isoterma de Langmuir é útil para prever a saturação da superfície e estimar a capacidade máxima de adsorção (Schons, 2021).

O modelo de Freundlich, de natureza empírica, baseia-se na hipótese de uma superfície heterogênea, composta por diversos tipos de sítios ativos de adsorção. Essa abordagem é especialmente eficaz na caracterização de materiais cerâmicos que apresentam porosidade variada, tanto em tamanho quanto em energia de adsorção, de acordo com Milhomem (2021). Em complemento, emprega-se o método BET, que pressupõe a formação de múltiplas camadas de moléculas adsorvidas. Esse procedimento é amplamente utilizado para mensurar a área superficial específica de sólidos porosos, por meio da adsorção de gás nitrogênio (N_2) à

temperatura de 77 K. Equipamentos como o NOVA 1000e são utilizados para gerar isotermas de adsorção e dessorção, essenciais para a aplicação dos modelos matemáticos propostos (Oliveira, 2019).

As isotermas obtidas são classificadas conforme a *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), sendo as mais comuns em cerâmicas as de Tipo II e IV, que indicam presença de mesoporos e formação de multicamadas de acordo com CRC (2025).

3.5.4 Teste de sólidos totais

A análise de sólidos totais é uma etapa fundamental na caracterização de líquidos fermentados, como o mosto da cana-de-açúcar, utilizado na produção de etanol. Essa técnica permite quantificar toda a matéria sólida presente na amostra, incluindo açúcares residuais, sais minerais, microrganismos e subprodutos da fermentação, sendo um indicador direto da eficiência fermentativa e da composição do meio (APHA; AWWA; WEF, 2017).

O método é gravimétrico, baseado na evaporação da água da amostra e posterior secagem do resíduo em estufa a 103–105 °C até massa constante. A concentração de sólidos totais é expressa em mg/L ou g/L, conforme equação descrita por Zambelli e Januário (2016), que também destacam a importância dessa análise para o controle da fermentação alcoólica em usinas sucroalcooleiras.

Durante o processo fermentativo, o teor de sólidos totais pode variar conforme a concentração inicial de açúcares (°Brix), a eficiência da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, a presença de contaminantes microbianos e a formação de subprodutos como ácidos orgânicos e biomassa (Zambelli; Januário, 2016). O monitoramento desses parâmetros permite avaliar o desempenho das linhagens de leveduras e a estabilidade do processo fermentativo.

A aplicação da técnica está alinhada com normas como a NBR 16271 (ABNT, 2019), que estabelece os requisitos para a qualidade da cana-de-açúcar destinada à produção de etanol, e os *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, de acordo com APHA *et al.* (2017), que orientam a execução de análises físico-químicas em líquidos.

3.5.5 Teste da presença de metais

A análise da presença de metais em amostras ambientais, industriais ou biológicas é essencial para o monitoramento da qualidade e segurança de processos, produtos e recursos

naturais. Metais como chumbo (Pb), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), arsênio (As), entre outros, podem apresentar toxicidade significativa, mesmo em baixas concentrações, sendo classificados como metais pesados, de acordo com ALS (2024). Conforme recomendação de NBR 16498 (ABNT, 2018) para verificar a presença de metais potencialmente tóxicos o Ferro (Fe), o Cobre (Cu), o Magnésio (Mg), o Manganês (Mn), o Zinco (Zn), o Cálcio (Ca) e o Potássio (K).

Os testes para detecção de metais geralmente se baseiam em técnicas espectrométricas, como:

- Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES);
- Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS);
- Espectrometria de Absorção Atômica com Chama (FAAS).

Essas técnicas permitem a quantificação precisa de metais em diferentes matrizes, como água, solo, efluentes e alimentos, com limites de detecção na ordem de $\mu\text{g/L}$ ou ng/L , dependendo do método e do elemento analisado, de acordo com a Rede Metrológica RS (2025).

Para análise, a amostragem deve seguir protocolos rigorosos para evitar contaminações externas. A preservação da amostra com ácido nítrico (HNO_3) é recomendada para estabilizar os metais dissolvidos. A filtragem em campo é necessária quando se deseja distinguir entre metais totais e metais dissolvidos (ALS, 2024).

A NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2017) estabelece os requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração, enquanto a NBR ISO/IEC 17043 (ABNT, 2024) trata dos ensaios de proficiência, garantindo confiabilidade nos resultados obtidos. Quanto às aplicações, pode-se citar:

- Monitoramento de efluentes industriais;
- Controle de qualidade de água potável;
- Avaliação de contaminação em solos agrícolas;
- Estudos toxicológicos e ambientais.

3.5.6 Teste do teor de álcool

A determinação do teor alcoólico em líquidos fermentados, como o mosto da cana-de-açúcar, é uma etapa essencial para o controle de qualidade na produção de etanol. Uma das técnicas utilizadas para essa finalidade é a ebulliometria, que se baseia na variação do ponto de ebulição de solução hidroalcoólica em relação à água pura, de acordo com Físico-química experimental, (2025).

A ebulliometria é uma aplicação das propriedades coligativas, que dependem da quantidade de partículas dissolvidas na solução, e não da sua natureza química. No caso de misturas água-etanol, o ponto de ebulição é alterado proporcionalmente à concentração de etanol, permitindo a estimativa do teor alcoólico por meio da diferença de temperatura entre a amostra e a água destilada (Portal São Francisco, 2025).

Segundo Costa (2010), antes da medição é necessário ajustar o ponto zero do ebulliômetro e realizar a diluição da amostra (geralmente 1:1 com água destilada). A temperatura de ebulição é registrada quando se estabiliza por pelo menos, 20 leituras consecutivas. A diferença entre o ponto de ebulição da amostra e da água é então utilizada em uma equação empírica para calcular o teor alcoólico em volume.

A Farmacopeia Brasileira VI Edição ANVISA (2019) e a NBR 5992 (ABNT, 2008) também descrevem métodos complementares para determinação do teor alcoólico, como o uso de densímetros e alcoômetros centesimais, que podem ser utilizados em conjunto com a ebulliometria para maior precisão.

3.6 Parâmetros

Parâmetros são variáveis que podem ser quantificadas objetivamente, permitindo a avaliação de fenômenos, processos ou produtos. Eles são essenciais para garantir controle, comparabilidade e confiabilidade em medições e análises técnicas, científicas ou operacionais.

Segundo Chapecali (2023), “os parâmetros mensuráveis são características que definem a adequação de um produto ou serviço para atender a requisitos específicos, sendo fundamentais para garantir precisão e exatidão nas medições realizadas”. Já a Anvisa (2020) destaca que “valores de referência para mensuração de um fenômeno ou objeto expressam um compromisso para alcançar objetivos, sendo considerados ideais para avaliação de qualidade e desempenho”.

Esses parâmetros são amplamente utilizados em áreas como metrologia, engenharia, saúde, educação e gestão ambiental, e podem incluir indicadores como turbidez, pH, temperatura, pressão, resistência mecânica, produtividade, eficiência energética, entre outros.

Os parâmetros analíticos são indicadores derivados de métodos técnicos e científicos que permitem mensurar com precisão aspectos de desempenho, qualidade e conformidade em projetos laboratoriais, ambientais ou operacionais. Segundo Chapecali (2023), “esses parâmetros

definem a adequação de um produto ou serviço para atender a requisitos específicos, sendo fundamentais para garantir precisão e exatidão nas medições realizadas”.

Principais categorias de parâmetros analíticos:

- Indicadores de desempenho: métricas como tempo de resposta, tempo médio de execução, eficiência operacional e taxa de retrabalho são essenciais para avaliar a qualidade de processos laboratoriais e industriais (Concentsistemas, 2025).
- Parâmetros físico-químicos: incluem pH, condutividade elétrica, turbidez, temperatura, DBO, DQO e concentração de compostos específicos. São amplamente utilizados em análises ambientais e sanitárias (Tratamento de Água, 2025).
- Análise estatística: envolve o uso de testes como média, desvio padrão, regressão linear, correlação e ANOVA para validar a consistência dos dados obtidos em ensaios e experimentos (Teixeira *et al.*, 2025; Ministério da Saúde Protocolo PEP, 2025).
- Medições instrumentais: realizadas com sensores, balanças analíticas, espectrofotômetros, potenciômetros, cronômetros e outros dispositivos calibrados. A metrologia 4.0 tem ampliado a precisão e a rastreabilidade das medições com Geremeias (2025).
- Taxas e proporções: indicadores como taxa de conversão, percentual de erro, índice de aproveitamento e coeficiente de variação (CV) são utilizados para avaliar eficiência e variabilidade dos métodos com Studocu (2025).

Cada parâmetro analítico deve ser previamente definido com:

- Unidade de medida padronizada;
- Método de coleta validado;
- Frequência de verificação estabelecida;
- Critérios de aceitação e controle de qualidade.

4. METODOLOGIA

Essa pesquisa foi inicialmente desenvolvida no Laboratório Biotecnologia Ambiental (LABAM/DEQ/CCET/UFS), sendo transferida para Laboratório de Tecnologias Alternativas (LTA) em parcerias com o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GEOPAV), Laboratório de Materiais de Construção e Estrutura (LAMCE), Laboratório de Bioquímica Industrial (LBI), Condomínio de Laboratórios Multiusuários do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais (CLMDCEM) e Laboratório de Saneamento Ambiental (SAMA).

4.1 Preparação dos fermentados

O caldo derivado da cana-de-açúcar foi adquirido no comércio local e levado ao Laboratório de Bioquímica Industrial do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Sergipe (UFS), onde os ensaios de obtenção do fermentado alcoólico foram realizados. De acordo com a Embrapa (2022), na avaliação de um processo de fermentação alcoólica, os indicadores mais relevantes são a produtividade e a eficiência, pois refletem, de forma integrada, variáveis como a temperatura de operação, o tempo de fermentação e a quantidade de açúcares não consumidos. Esses fatores, embora não estejam diretamente expressos, influenciam significativamente o desempenho geral do processo. Na Figura 1A ilustra-se a fabricação do caldo de cana-de-açúcar na feira livre e na Figura 1B o caldo de cana-de-açúcar dentro do erlenmeyer.

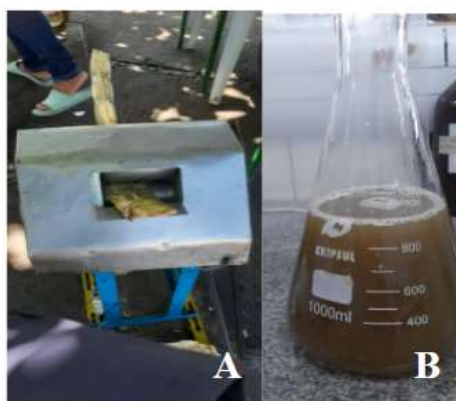


Figura 1 - Fabricação do caldo de cana-de-açúcar na feira livre: A) Moedor de cana-de-açúcar.

B) Caldo de cana-de-açúcar

Fonte: Autora (2025).

Segundo Peixoto *et al.* (2012), a concentração de sacarose no caldo da cana-de-açúcar foi inicialmente determinada por meio de um sacarímetro, utilizando a escala de Brix (°Bx). Essa

escala representa a porcentagem de sólidos solúveis presentes em soluções aquosas, sendo amplamente empregada na indústria sucroalcooleira para estimar o teor de sacarose. De acordo com a Associação dos Produtores de Cana-de-Açúcar (APPC, 2024), o grau Brix é uma medida numérica que expressa a massa de sacarose (em gramas) dissolvida em 100 gramas de solução. Em termos práticos, trata-se de um indicador direto da doçura e da qualidade de frutas, sucos, hortaliças e especialmente, da cana-de-açúcar.

Na indústria agroalimentar, o grau Brix é considerado um parâmetro crítico de controle de qualidade. Conforme Hudson Junior (2022), em estudo realizado na Universidade Federal Fluminense, o Brix é o único parâmetro exigido por legislação brasileira para padronização de doces tradicionais, sendo utilizado como critério de aceitação ou rejeição de lotes na produção. Além disso, materiais de referência certificados para calibração de refratômetros, como os desenvolvidos segundo as normas NBR ISO 17034 (ABNT, 2017) e NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2017), garantem precisão metrológica na aferição do índice de refração, diretamente relacionado ao grau Brix (Visomes, 2025). O Brix não apenas representa um indicador físico-químico, mas também um fator econômico relevante na cadeia produtiva sucroenergética.

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, os parâmetros de produtividade e eficiência fermentativa são considerados os mais relevantes na avaliação de processos fermentativos, pois englobam variáveis como temperatura, tempo de fermentação e concentração de açúcares residuais, de acordo com a Embrapa (2022).

Inicialmente, foram mensurados 6.300 mL de caldo de cana, os quais foram transferidos para um balão de vidro. O teor de sólidos solúveis foi ajustado com água destilada até atingir 14–16 °Brix, conforme recomendação técnica para otimização da atividade fermentativa, de acordo com Visomes (2025), totalizando um volume final de 7.800 mL. Em seguida, foram pesados aproximadamente 78 g de fermento biológico comercial (*Saccharomyces cerevisiae*), que foi incorporado ao mosto para indução da fermentação alcoólica. A cada intervalo de 24 horas, foi realizada a aferição do grau Brix, com o objetivo de monitorar a conversão dos açúcares em etanol.

Segundo Di Renzo e Reale (2025), a fermentação alcoólica é um processo bioquímico complexo que se inicia com a adição do mosto ao inóculo de leveduras. Na fase preliminar, quando a concentração de células é reduzida, ocorre a multiplicação das leveduras, com consumo gradual de açúcares e baixa produção de etanol. Para otimizar a produtividade, recomenda-se o

uso de cepas de *Saccharomyces cerevisiae* com alta taxa de multiplicação e tolerância ao etanol, de acordo com Sturme *et al.* (2025).

A fase de pós-fermentação ocorre com a redução da liberação de gás, queda da temperatura e diminuição da atividade fermentativa das leveduras, devido ao esgotamento dos substratos e à presença de compostos inibitórios acumulados durante o processo (Di Renzo; Reale, 2025).

A determinação de ° Brix refere-se à medição da concentração de sólidos solúveis em uma solução, geralmente utilizada para avaliar o teor de açúcar em líquidos como sucos, xaropes e mostos fermentados. Esse parâmetro é essencial na indústria de alimentos e bebidas, especialmente na produção de etanol e derivados da cana-de-açúcar. Segundo Zarpelon (2020), a medição do Brix pode ser realizada por meio de areômetros e refratômetros, que são calibrados para sacarose. No entanto, devido à presença de sais residuais, o Brix aparente pode ser mais alto do que o real. Na Figura 2A, tem-se a ilustração do refratômetro portátil RTA-50 utilizado, na Figura 2B medidor de temperatura, pH. e condutividade elétrica, na Figura 2C medidor de turbidez e de cor aparente.



Figura 2 - Instrumentos: A) Aparelho da INSTRUTHERM utilizado para o estudo.
B) Aparelho AKTO utilizado para o estudo. C) Aparelho Colorimeter utilizado para o estudo.
Fonte: Autora (2025).

A fermentação principal, de acordo com a Figura 3B cessou quando o valor de Brix deixou de apresentar variações significativas, indicando o esgotamento dos açúcares fermentáveis. Esse momento é marcado pela redução na liberação de dióxido de carbono (CO_2) e pela diminuição da turbulência do mosto, como ilustrado na fase de pós-fermentação (Figura 3C).

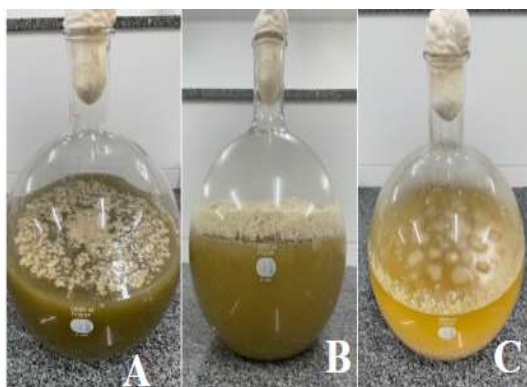


Figura 3- Produção do fermentado, fases da fermentação: A) Fase preliminar, logo após a adição do fermentado biológico. B) Fase tumultuosa. C) Fase pós-fermentação.

Fonte: Autora (2025).

4.2 Características dos resíduos das telhas cerâmicas

Os resíduos provenientes de telhas cerâmicas, também denominados resíduos de cerâmica vermelha, são gerados principalmente durante os processos de fabricação, transporte, manuseio e descarte de telhas danificadas ou fora de especificação. Esses resíduos apresentam propriedades físico-químicas que os tornam potenciais insumos para aplicações alternativas na construção civil, como pavimentação, argamassas, concretos e processos de clarificação.

A caracterização granulométrica desses resíduos, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2025), permite sua classificação em frações como pedregulho, areia, silte e argila, o que é essencial para avaliar sua aplicabilidade em diferentes contextos.

4.3 Ensaio de peneiramento

As telhas (Figura 4A) utilizadas no processo de clarificação foram obtidas junto à Superintendência de Infraestrutura da Universidade Federal de Sergipe (INFRA/UFS). Para fins de caracterização e aplicação, essas telhas passaram por processo de trituração mecânica, realizado no Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GEOPAV/UFS), em conformidade com os procedimentos descritos na NBR 7181 (ABNT, 2025), que estabelece os métodos para análise granulométrica de solos e materiais particulados.

A trituração foi conduzida utilizando equipamentos da marca Pavitest (Figura 4B) e Viatest (Figuras 4C, 4D e 4E), com o objetivo de reduzir o material a partículas adequadas para classificação granulométrica. Após a trituração, o material foi submetido à peneiramento elétrico com conjunto de peneiras padronizadas (Figura 5), também da marca Viatest, permitindo a separação das frações conforme os limites de diâmetro estabelecidos pela norma.



Figura 4 - Etapas da trituração das telhas cerâmicas: A) Telhas cerâmicas a serem trituradas; B) Triturador de materiais grossos, moinho de mandíbulas; C) Bolas de alumina que são colocadas no cilindro a ser anexado no encaixe do aparelho; D) Cilindro do moinho de bolas; E) Aparelho do encaixe do cilindro de moinho de bolas. Fonte: Autora (2025).

O peneirador elétrico ilustrado na Figura 5A e 5B é um equipamento utilizado na análise granulométrica para separar partículas de diferentes tamanhos de forma eficiente e precisa. Ele funciona por meio de vibrações ou fluxo de ar, permitindo que as partículas menores passem pelas peneiras enquanto as maiores ficam retidas. Esses equipamentos são amplamente utilizados em setores como construção civil, indústria farmacêutica e análise de solos, de acordo com Metal Cairo Ltda (2020).



Figura 5 - Conjunto de peneirador: A) Peneirador Elétrico; B) Peneiras de aberturas de 1,18 mm, 590 μm , 425 μm , 250 μm , 150 μm , 75 μm e 53 μm e o fundo. Fonte: Autora (2025).

O ensaio de granulometria é utilizado para determinar a distribuição dos tamanhos de partículas em uma amostra sólida, sendo essencial para caracterizar materiais particulados como solos, agregados, pós industriais e catalisadores. Ele pode ser realizado por peneiramento (frações grossas) e/ou sedimentação (frações finas), conforme a NBR 7181 (ABNT, 2025).

1. Preparação da Amostra

- Secagem da amostra em estufa a 105 °C até massa constante;
- Desagregação manual ou mecânica para evitar aglomeração de partículas;
- Determinação da umidade (se necessário) conforme NBR 6457 (ABNT, 2024).

2. Peneiramento (Frações > 0,075 mm)

- Utilizou-se um conjunto de peneiras padronizadas com aberturas decrescentes;
- A amostra foi colocada no topo do conjunto e submetida à agitação mecânica por tempo determinado;
- Cada fração retida é pesada e expressa como porcentagem da massa total;
- Os dados foram usados para construir a curva granulométrica.

Segundo a classificação granulométrica conforme Caputo *et al.* (2008), os materiais foram distribuídos nas seguintes frações:

Quadro 01- Classificação da granulometria. Segundo ABNT-NBR 6502/95

Classificação	Diâmetro dos grãos (mm)
Bloco de Rocha	$d > 1000$
Matacão	$200 < d < 1000$
Seixo	$60 < d < 200$
Grânulo	$2 < d < 60$
Areia grossa	$0,6 < d < 2$
Areia média	$0,2 < d < 0,6$
Areia fina	$0,06 < d < 0,2$
Silte	$0,002 < d < 0,06$
Argila	$d < 0,002$

Fonte: Caputo, (2014).

Após a trituração, os resíduos de telhas cerâmicas foram levados para estufa da marca Quimis, para o ensaio de granulometria normatizada pela seguindo as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 2025). Os resíduos de telhas cerâmicas foram higienizados com a solução de hipoclorito 15 min, seguidas de filtração em papel qualitativo onde foram realizadas 11 lavagens até a neutralidade. Para garantir a remoção de impurezas, uma parte das amostras foram imersas em solução de ácido clorídrico por 5 h, seguidas de filtração e lavagem até a neutralidade. As

amostras retidas no papel de filtro foram secas em estufa de secagem a 80 °C, por 24 horas até o peso constante e armazenadas em erlenmeyer à temperatura ambiente, posteriormente foram autoclavadas no aparelho da marca Prismatec, na temperatura de 120°C e 1 atm, como observa-se na Figura 6.



Figura 6 - Aparelho Autoclave utilizado para o estudo.
Fonte: Autora (2025).

Cálculos dos parâmetros granulométricos

Para a montagem da curva granulométrica, foi necessário calcular as informações:

- **D₁₀**: Diâmetro efetivo — representa o tamanho abaixo do qual 10% da amostra é mais fina.
- **D₃₀**: Diâmetro da partícula para a qual 30% da amostra analisada é menor ou igual a esse valor.
- **D₆₀**: Diâmetro correspondente a 60% passante.
- **CU (Coeficiente de Uniformidade)**:

$$\frac{D_{60}}{D_{10}} \text{ (Equação 1)}$$

- **CC (Coeficiente de Curvatura)**:

$$\frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \text{ (Equação 2)}$$

4.4 Preparação do coagulante natural de *Moringa oleifera* Lam.

Neste trabalho, as vagens foram obtidas no bairro Augusto Franco, em Aracaju/SE, e levadas à Universidade Federal de Sergipe (UFS), campus São Cristóvão, onde as sementes foram descascadas e submetidas à secagem solar por sete dias no Laboratório de Energias Alternativas (LTA). Posteriormente, as sementes passaram por secagem em estufa a 65 °C por 24

horas no Laboratório de Saneamento Ambiental (SAMA), conforme metodologia adaptada por Santos (2022). Em seguida, realizou-se a maceração com pilão, seguida de peneiramento em malha nº 20 (850 μm) para obtenção do pó das sementes. A preparação do coagulante consistiu na diluição de 20 g do pó em 1000 mL de água destilada (2%), com agitação mecânica por dois minutos. Esse extrato foi então refinado por meio de peneiramento em malha nº 100 (150 μm) Michelin *et al.* (2021).

Para os testes de clarificação do fermentado alcoólico de caldo de cana-de-açúcar, foram utilizados 5 mL do extrato de moringa para cada 500 mL de amostra, proporção validada em estudos anteriores como eficaz para redução de turbidez e sólidos de acordo com Barbosa *et al.* (2019) e Ferreira e Silva (2023). A eficiência do coagulante está diretamente relacionada ao preparo, à concentração e à forma de aplicação, sendo recomendada a utilização de extratos frescos e filtrados para evitar interferências orgânicas e garantir a estabilidade da solução de acordo com Ferreira *et al.* (2024) e Santos (2022).

Posterior a essa etapa, foi feita a maceração com pilão, sendo peneirado os resíduos da trituração das sementes de *Moringa oleifera* Lam. em malha de nº. 20 (850 μm). Com o material peneirado, adicionou-se água destilada a 2% (20g de moringa para 1000 ml H_2O), agitação mecânica por 2 minutos com o peneiramento realizado na malha nº.100 (150 μm) para a preparação do coagulante (Figura 7), ilustrando as etapas para preparação do coagulante de *Moringa oleifera* Lam. de modo a atuar no processo de clarificação do fermentado alcoólico de cana-de-açúcar.



Figura 7- Etapas para obtenção do coagulante de moringa: A) Vagem da moringa. B) Semente com casca. C) Semente descascada. D) Trituração da semente. E) Pesagem do pó após passar pela peneira com abertura de 0,125 mm.

F) Preparação do coagulante G) Agitação mecânica. H) Peneiramento com abertura de 0,125 mm.

Fonte: Autora (2025).

4.5 Caracterização

A caracterização teve como objetivo avaliar o desempenho de processos físicos, químicos e biológicos. Neste estudo, foram realizados os seguintes testes: clarificação, BET, teor de álcool, análise de pH, cor, turbidez, condutividade elétrica, sólidos totais e metais potencialmente tóxicos.

4.5.1 Teste de clarificação

Para os testes de clarificação do fermentado alcoólico de caldo de cana-de-açúcar, foi utilizado o equipamento Jar Test da marca Policontrol, conforme ilustrado na Figura 8. As condições operacionais foram adaptadas de protocolos recentes de tratabilidade com coagulantes naturais e suportes sólidos, como os descritos por Maciel e Leal (2025) e Ferreira *et al.* (2024). O ensaio foi conduzido em três etapas principais, conforme metodologia de Michelan *et al.* (2021):

- Mistura rápida: agitação a 80 rpm por 1 minuto para promover a dispersão inicial do coagulante;
- Mistura lenta: redução da velocidade para 40 rpm por 20 minutos, favorecendo a formação de flocos;
- Decantação: repouso das amostras por dois tempos distintos — 30 minutos e 2h30min — para avaliação da eficiência de sedimentação. O tempo de 2h30min foi adaptação para o estudo atual.

Embora a metodologia tenha sido originalmente desenvolvida para aplicação com *Moringa oleifera* Lam. em fase líquida, neste estudo foi adaptada para uso simultâneo com resíduo cerâmico triturado como suporte sólido, conforme abordagem proposta por Ferreira e Silva (2023), de acordo com a Figura 8 vemos as amostras de fermentado no Aparelho Jar Test, com os respectivos materiais a serem adicionados para clarificação.

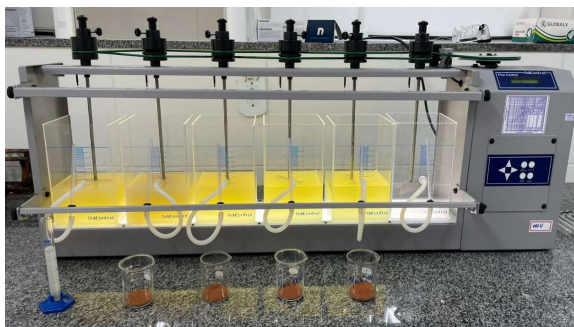


Figura 8 - Aparelho Jar Test utilizado para o estudo.
Fonte: Autora (2025).

As análises físicas e químicas foram processadas para o caldo de cana-de-açúcar, fermentado, fermentado com adição do coagulante de moringa e com adição de resíduo cerâmico pulverulento retidos nas peneiras com aberturas de malhas 425 μm , 250 μm , 150 μm , 75 μm , medidos nos aparelhos das marcas Colorimeter e AKTO. De acordo com o Figura 9, é apresentado a ilustração das etapas de preparação da amostra para os tipos de tratamento e parâmetros analíticos.



Figura 9 - Fluxograma de análises físico-químicas.
Fonte: Autora (2025).

Utilizando a técnica da decantação para coleta das amostras estudadas, permanece como uma técnica fundamental na separação de fases em misturas heterogêneas, especialmente em contextos ambientais e laboratoriais. Nos últimos anos, sua aplicação tem sido reforçada por diretrizes normativas e estudos que destacam sua relevância na coleta e preservação de amostras.

Segundo o Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras Ambientais da CETESB

(2021), a decantação é recomendada como etapa preliminar para a separação de sólidos sedimentáveis em amostras de água e efluentes, visando garantir a representatividade da fração líquida para análises químicas e microbiológicas.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) publicou em 2024 uma resolução que atualiza os procedimentos para coleta e preservação de amostras ambientais, reforçando o uso da decantação como técnica de separação física antes do acondicionamento e transporte das amostras.

Além disso, o Guia nº 19/2019 da ANVISA, atualizado em 2022, estabelece que a decantação pode ser utilizada como método complementar à filtração na preparação de amostras para análises laboratoriais, especialmente em sistemas de vigilância sanitária.

4.5.2 Teste BET

O equipamento utilizado foi o NOVA 1000e – Surface Area & Pore Size Analyzer, da Quantachrome Instruments. O teste BET foi baseado na adsorção física de gás (geralmente nitrogênio) sobre a superfície de um sólido a baixa temperatura (77 K). Ele permite calcular a área superficial total do material por meio da quantidade de gás adsorvido. Para a obtenção dos resultados, utilizou-se as equações 3, 4 e 5.

Equação linear BET:

$$\frac{P}{[V(P_o - P)]} = \frac{1}{(V_m \times C)} + \frac{(C - 1)}{(V_m \times C)} \times \frac{P}{P_o} \text{ (Equação 3)}$$

Onde:

- **P**=Pressão do gás adsorvido. Unidade: Pa (Pascal) ou mmHg
- **P_o**=Pressão de saturação do gás (pressão máxima de adsorção). Unidade: Pa ou mmHg
- **V**=Volume de gás adsorvido na pressão **P**. Unidade: cm³/g ou cm³(STP)/g
- **V_m**=Volume de gás necessário para formar uma monocamada sobre o sólido. Unidade: cm³/g ou cm³(STP)/g
- **C**=Constante de BET, relacionada à energia de adsorção. Unidade: adimensional

Área superficial específica (BET):

$$S_{BET} = \frac{(V_m \times N_A \times \sigma)}{m} \text{ (Equação 4)}$$

Onde:

- **SBET**= Área superficial específica do material. Unidade: (m²/g)
- **V_m** = Volume de gás adsorvido na monocamada (obtido pela equação BET). Unidade: cm³(STP)/g
- **NA** = número de Avogadro (6,022 × 10²³ mol⁻¹). Unidade: mol⁻¹
- **σ** = área ocupada por uma molécula de N₂ (~0,162 nm²). Unidade: m²/molécula
- **m** = massa da amostra (g). Unidade: g

Seguiu-se a seguinte sequência:

1. Degasagem da amostra A amostra é aquecida sob vácuo (ex: 150 °C por 2 horas) para remover contaminantes como água e óleos adsorvidos.
2. Adsorção de gás A amostra é exposta ao gás (N₂) em diferentes pressões relativas

$$\frac{P}{P_0} \text{ (Equação 5)}$$

Onde:

P=Pressão do gás adsorvido. Unidade: Pa (Pascal) ou mmHg

P₀=Pressão de saturação do gás (pressão máxima de adsorção). Unidade: Pa ou mmHg

O volume de gás adsorvido foi medido em cada ponto.

3. Construção da isoterma BET os dados são usados para construir um gráfico linear de que permite calcular:
 - V_m: volume de gás necessário para formar uma monocamada. Unidade: cm³(STP)/g
 - CC: constante relacionada à energia de adsorção. Unidade: adimensional.
4. Cálculo da área superficial específica A área foi obtida pela equação:

$$SBET = \frac{(V_m \times NA \times \sigma)}{m} \text{ (Equação 4)}$$

O método BET é uma extensão da teoria de Langmuir, que considera apenas uma monocamada. O BET assume múltiplas camadas de adsorção de acordo com Afinko (2021) e Oliveira (2019). Para garantir a precisão dos resultados, a amostra é previamente submetida à degaseificação a 150 °C por 2 horas, eliminando contaminantes como água e compostos orgânicos voláteis. No presente estudo, foram utilizados 300 mg de amostra, com pontos de adsorção entre 0,05 e 0,99 P/P₀ e de dessorção entre 0,99 e 0,05 P/P₀, totalizando 40 pontos. O equipamento

utilizado foi o NOVA 1000e – Surface Area & Pore Size Analyzer, da Quantachrome Instruments, representado pela Figura 10.



Figura 10- Equipamento NOVA 1000e, Surface Area & Pore Size Analyzer. Quantachrome.
Fonte: Autora (2025).

De acordo com o Quadro 02 o tipo de isotermas é caracterizado pelo tipo de material (Thommes et al., 2015):

Quadro 02- Tipos de isotermas segundo a IUPAC

Tipos	Características	Materiais típicos
Tipo I	Adsorção em microporos (<2 nm); formação de monocamada.	Zeólitas, carvões ativados.
Tipo II	Adsorção em superfícies não porosas ou macroporosas; formação de multicamadas.	Sílica gel, óxidos metálicos.
Tipo III	Interações fracas entre adsorvente e adsorvato; sem formação de monocamada.	Superfícies hidrofóbicas.
Tipo IV	Adsorção em mesoporos (2–50 nm); presença de histerese por condensação capilar.	Peneiras moleculares mesoporosas.
Tipo V	Sem formação de monocamada; interações fracas em mesoporos hidrofóbicos.	Adsorção de água em materiais hidrofóbicos.
Tipo VI	Adsorção em camadas sucessivas sobre superfície uniforme.	Grafite, argônio em superfícies planas.

Fonte: Thommes et al. (2015).

4.5.3 Teste do teor de álcool

A determinação do teor alcoólico foi realizada por meio da técnica de ebuliometria, que se baseia na diferença entre os pontos de ebulição da água destilada e da solução hidroalcoólica. Essa metodologia é fundamentada nas propriedades coligativas das soluções, em especial na diminuição da pressão de vapor causada pela presença de etanol, o que altera o ponto de ebulição da mistura (Físico-Química Experimental, 2025).

O procedimento foi conduzido utilizando um ebuliômetro de precisão, operando sob condições isobáricas. Inicialmente, o equipamento foi calibrado com 50 mL de água destilada, estabelecendo o ponto de referência para o zero alcoólico. Em seguida, foram preparadas amostras diluídas na proporção 1:1 (fermentado:água destilada), conforme recomendação técnica para evitar interferências por compostos voláteis não alcoólicos (Portal São Francisco, 2025).

A amostra diluída foi inserida no balão de destilação, (Figura 11), com o termômetro posicionado a aproximadamente 1 cm do fundo. O sistema foi aquecido até que a temperatura de ebulição se estabilizasse por 20 leituras consecutivas, garantindo a confiabilidade da medição. O método apresenta boa reprodutibilidade e é recomendado para amostras fermentadas com baixo teor de sólidos, como o caldo de cana após fermentação alcoólica (Fernandes *et al.*, 2021; Embrapa, 2025).



Figura 11- Ebuliômetro.
Fonte: Fonte: Autora (2025).

4.5.4 Teste de sólidos totais

A análise de sólidos totais foi realizada com base na metodologia gravimétrica descrita nos *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2017),

sendo adaptada para amostras líquidas fermentadas de cana-de-açúcar. Essa técnica permite quantificar toda a matéria sólida presente na amostra, incluindo os sólidos dissolvidos e suspensos, sendo amplamente utilizada em estudos de qualidade de água, efluentes e líquidos alimentares de acordo com a NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2021) e INMETRO. DOQ-CGCRE-044 (2022).

Inicialmente, as amostras foram homogeneizadas e uma alíquota de 20 mL foi transferida para cápsulas de porcelana previamente secas e pesadas. As cápsulas foram colocadas em estufa a 105 °C por um período mínimo de 24 horas, conforme especificado pela NBR 9898 (ABNT, 2021). Após a secagem, as cápsulas foram resfriadas em dessecador com sílica gel por 30 minutos e pesadas em balança analítica com precisão de 0,1 mg.

Para garantir a confiabilidade dos resultados, todas as análises foram realizadas em duplicata e os valores foram expressos como média em porcentagem (Figura 12). O procedimento seguiu os critérios de controle de qualidade descritos na norma NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2017), assegurando rastreabilidade e precisão dos dados obtidos.



Figura 12- Amostras pós-estufa nas cápsulas de porcelana.
Fonte: Autora (2025).

4.5.5 Teste da presença de metais

A abertura de amostras consiste na transformação da matriz sólida ou complexa em solução líquida, permitindo a análise quantitativa dos metais presentes. O procedimento varia conforme o tipo de amostra (solo, sedimento, alimento, água, cerâmica etc.) e os metais-alvo. Os métodos mais utilizados são a digestão ácida e a fusão alcalina, conforme descrito por Krug (2008) e APHA (2017). De acordo com a Figura 13 observa-se amostras para teste já abertas com o método de digestão ácida.



Figura 13- Abertura das amostras para o teste.

Fonte: Autora (2025).

A digestão ácida é o método mais comum e envolve o uso de ácidos concentrados para solubilizar os metais:

● **Ácidos utilizados:**

- Ácido nítrico (HNO_3): oxidante, ideal para metais como Cu, Zn, Fe, Pb;
- Ácido clorídrico (HCl): não oxidante, útil para dissolver carbonatos e cloretos metálicos;
- Água régia ($\text{HNO}_3:\text{HCl}$, 1:3): dissolve metais nobres como Au e Pt;
- Ácido fluorídrico (HF): necessário para dissolver silicatos e cerâmicas (com extremo cuidado).

Utilização dos equipamentos:

- Sistema de digestão em bloco aquecido ou micro-ondas com vasos de Teflon;
- Capela de exaustão para segurança química.

Procedimento típico:

1. Pesar 0,5 a 1,0 g da amostra seca e moída;
2. Adicionar mistura de ácidos (ex: 5 mL HNO_3 + 2 mL HCl);
3. Aquecer a 120–180 °C por 1–2 horas até completa dissolução;
4. Filtrar, completar o volume e analisar por espectrometria.

Na análise dos metais presentes em amostras utilizando espectrometria de absorção atômica, é fundamental utilizar o comprimento de onda adequado para cada elemento a fim de garantir precisão e sensibilidade na leitura. Para os elementos estudados neste trabalho, os comprimentos de onda típicos são os seguintes: ferro é analisado a 248,3 nanômetros; cobre, a 324,8 nanômetros; magnésio, a 285,2 nanômetros; manganês, a 279,5 nanômetros; zinco, a 213,9

nanômetros; cálcio, a 422,7 nanômetros; sódio, a 589,0 nanômetros e potássio, a 766,5 nanômetros (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 2017).

Conforme recomendação de NBR 16498 (ABNT, 2018) para verificar a presença de metais potencialmente tóxicos a fermentação promoveu reduções discretas nos teores de Fe, Cu, Mg, Mn, Zn, Ca, Na e K.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Estudo de granulometria

Segundo Caputo (2014), às dimensões das partículas são distribuídas em “frações constituintes”, das quais são classificadas de acordo com a escala granulométrica brasileira, normatizada pela NBR 7181 (ABNT, 2025) que é representada pela curva granulométrica.

Com base no ensaio granulométrico, observou-se que das 7 peneiras utilizadas, apenas quatro e mais o fundo, apresentaram material retido. Este resultado encontra-se ilustrado na Tabela 03. Diante disso, nas peneiras com aberturas de malhas 425 μm , 250 μm , 150 μm , 75 μm tiveram material (98,19 g) para ser utilizado no processo de clarificação do fermentado.

Houve os tratamentos de descontaminação com os materiais retidos (resíduo cerâmico: RC) nas # das peneiras com aberturas 425 μm , 250 μm , 150 μm , 75 μm , para limpeza de contaminantes biológicos, após o ensaio de granulometria. As massas obtidas para cada abertura de peneira estão citadas na (Tabela 01).

Tabela 01- Dados da peneiração da granulometria, segundo ABNT-NBR 6502/95.

Abertura	Peso (g)
1,18 mm	-
590 μm	-
425 μm	21,92
250 μm	22,88
150 μm	25,78
75 μm	27,61
53 μm	-
Fundo	8,42

Fonte: Autora (2025).

A ausência de material retido nas peneiras de 1,18 mm e 590 μm indica a ausência de partículas grosseiras, como cascalho ou areia grossa.

A maior concentração de massa retida ocorre nas peneiras de:

- 425 μm (21,92 g) – Areia média
- 250 μm (22,88 g) – Areia fina
- 150 μm (25,78 g) – Areia muito fina
- 75 μm (27,61 g) – Transição entre areia muito fina e silte

O material no fundo (8,42 g) representa partículas ainda mais finas, como silte ou argila.

Esse tipo de material tende a ter alta permeabilidade e baixa coesão, características que o tornam pouco adequado para estruturas de suporte ou fundações em locais sujeitos à saturação. Por outro lado, pode ser eficaz em obras de drenagem ou filtros, desde que devidamente estabilizado de acordo com Caputo (2014), de acordo com a Tabela 02.

Tabela 02- Dados da peneiração da granulometria, % que passa da amostra total.

Abertura (mm)	Peso (g)
1,18	100
0,6	100
0,42	79,44
0,25	57,98
0,15	33,8
0,075	7,9

Fonte: Autora (2025).

A análise da distribuição granulométrica revelou que 100% da amostra passou pelas peneiras de 1,18 mm e 0,6 mm, indicando ausência de material grosso, composto exclusivamente por partículas menores que essas aberturas. Esse comportamento caracteriza a amostra como livre de elementos grosseiros e predominantemente formada por grãos finos e médios. Conforme apontado por Sampaio e Gomes (2021), essa interpretação é típica de materiais particulados homogêneos, nos quais as faixas mais elevadas do peneiramento não retêm nenhum conteúdo significativo.

Na faixa intermediária (0,42 mm a 0,25 mm), observou-se queda acentuada na porcentagem de material retido — de 79,44% para 57,98% — indicando concentração expressiva de partículas nesta granulometria. Essa distribuição é característica de materiais de granulometria média, com predominância de sedimentos relativamente estáveis em processos físicos de separação, de acordo com Sampaio; Gomes, 2021).

Por fim, apenas 7,9% da amostra conseguiu passar pela peneira de 0,075 mm, revelando baixa presença de partículas muito finas (como silte ou argila). Esse dado pode ser interpretado positivamente em contextos onde partículas extremamente finas são indesejáveis por sua baixa permeabilidade e por dificultarem processos de filtração ou clarificação, conforme orientações, de acordo com NBR 7181 (ABNT, 2025).

A curva resultante tende ao formato sigmoide decrescente, com perfil compatível com materiais bem graduados e com distribuição granulométrica diversificada — ainda que o platô inicial nos 100% possa indicar certo grau de uniformidade na fração mais grossa (Lagetec, 2017).

Com isso, o gráfico resultante na Figura 14 deste peneiramento tenderia a uma curva sigmoide decrescente, típica de solos bem graduados (granulometria diversificada), embora haja um “degrau” nos 100% iniciais que pode sugerir uniformidade em determinada faixa de tamanho.

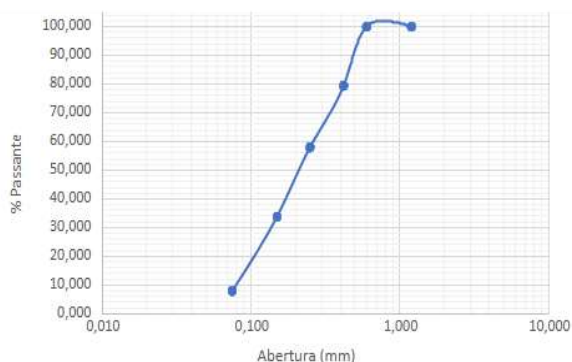


Figura 14- Dados da curva granulométrica.
Fonte: Autora (2025).

Para isso, fez-se necessário uma interpolação linear entre os valores fornecidos. Com base nos dados da curva granulométrica, obteve-se os dados da interpolação:

- **$D_{10} \approx 0,11$ mm** (entre 0,15 mm e 0,075 mm)
- **$D_{30} \approx 0,20$ mm** (entre 0,25 mm e 0,15 mm)
- **$D_{60} \approx 0,38$ mm** (entre 0,42 mm e 0,25 mm)

Obs: Esses valores são aproximados, baseados na interpolação visual de uma curva de % acumulado $\times$ abertura.

Com os dados de D_{10} , D_{30} e D_{60} obteve-se os parâmetros D_{10} , D_{30} , D_{60} , CU e CC, dados na Tabela 03:

Parâmetro	Valor Aproximado (mm)
D_{10}	0,11
D_{30}	0,20
D_{60}	0,38
CU	3,45
CC	0,96

Fonte: Autora (2025).

A caracterização granulométrica da amostra foi complementada pela análise dos coeficientes de uniformidade (CU) e de curvatura (CC), conforme estabelecido pela norma NBR

7181 (ABNT, 2025). Esses parâmetros são amplamente utilizados para avaliar a distribuição de tamanhos de partículas em materiais granulares e sua classificação quanto à graduação.

O valor obtido para o coeficiente de uniformidade ($CU \approx 3,45$) indica que o solo apresenta uma graduação intermediária, não sendo considerado bem graduado segundo os critérios convencionais, que exigem $CU > 4$ para areias e $CU > 6$ para pedregulhos, de acordo com Pinto (2006) e Guia da Engenharia (2020). Esse resultado sugere que há uma variação moderada nos tamanhos das partículas, com presença significativa de uma faixa dominante.

Já o coeficiente de curvatura ($CC \approx 0,96$) encontra-se ligeiramente abaixo da faixa ideal de 1 a 3, recomendada para solos bem graduados. Esse valor indica que a curva granulométrica apresenta baixa simetria e que há predominância de partículas em uma faixa específica de diâmetro, o que pode comprometer a eficiência de compactação e a estabilidade mecânica do material, de acordo com (Sampaio; Gomes, 2021; Viana, 2016).

Portanto, os resultados obtidos para CU e CC apontam que o material analisado não atende aos critérios de solo bem graduado, sendo classificado como medianamente graduado, com distribuição granulométrica concentrada em uma faixa limitada de tamanhos. Essa condição pode influenciar diretamente o comportamento físico-hidráulico do material, especialmente em aplicações que exigem boa compactação ou permeabilidade controlada. A predominância de partículas em faixas específicas de tamanho, aliada à estrutura porosa observada, confere ao material potencial significativo para uso em processos de clarificação, onde a retenção seletiva de impurezas e a formação de flocos são favorecidas por características granulométricas mais uniformes.

5.2 Fermentado alcoólico

Para o presente estudo, realizou-se o acompanhamento do ° Brix, não apenas do fermentado, mas também do caldo de cana-de-açúcar, caldo diluído, seja com adição de moringa e com adição de resíduo cerâmico (Tabela 04 e 05). Segundo Zarpelon (2020), o valor de Brix 5 no fermentado indica que há cerca de 5% de sólidos solúveis, principalmente açúcares, presentes no líquido, assim como os demais valores da Tabela 01 e 02. Esse índice pode ser influenciado por vários fatores, como:

A mensuração dos valores de °Brix nas amostras fermentadas forneceu informações relevantes sobre a eficiência do processo fermentativo e o comportamento dos diferentes

tratamentos. Os resultados indicam que amostras com valores de Brix mais baixos estão associadas a uma maior conversão de açúcares em etanol, evidenciando a atuação eficaz das leveduras no metabolismo dos açúcares presentes no caldo de cana-de-açúcar. Além disso, a composição inicial do caldo fermentado mostrou-se determinante para os valores finais de Brix observados. Amostras que apresentavam concentração inicial de açúcares reduzida resultaram em valores finais igualmente baixos, independentemente do tipo de tratamento aplicado, reforçando que o teor de sólidos fermentescíveis influencia diretamente na resposta da variável em estudo.

Observou-se que o caldo de cana-de-açúcar, em sua forma concentrada e natural, apresentou o maior valor de °Brix entre todas as amostras analisadas. Após diluição com água destilada, houve redução significativa do teor de sólidos solúveis, evidenciando a sensibilidade do índice Brix à concentração de sacarose, de acordo com Di Renzo e Reale (2025). Na amostra fermentada, o valor de Brix estabilizou em aproximadamente 5 °Bx, indicando que as leveduras convertem os açúcares disponíveis em etanol, conforme esperado no processo fermentativo, de acordo com Kim *et al.* (2025).

O início da fermentação tumultuosa é evidenciado pela liberação intensa de dióxido de carbono (CO₂), aumento da temperatura do meio e formação de espuma. Essa fase é caracterizada por elevada atividade metabólica, sendo necessário o controle térmico para evitar inibição da fermentação (Kim *et al.* 2025). A elevação da acidez do mosto também é observada, resultado da produção de ácidos orgânicos e da degradação de açúcares residuais.

Observou-se queda na temperatura do meio, aumento da acidez e redução da atividade fermentativa das leveduras, atribuída ao acúmulo de metabólitos inibitórios, à exaustão dos carboidratos e à presença de toxinas oriundas de contaminantes (Di Renzo; Reale, 2025).

Diversos estudos destacam que tempo e temperatura são variáveis críticas na eficiência da conversão de açúcares durante a fermentação. Quando essas condições não são otimizadas, há tendência de formação incompleta de etanol e valores elevados de Brix residual, como você mencionou.

- Cancelier *et al.* (2020) observaram que temperaturas acima de 35 °C reduziram a eficiência fermentativa na produção de bebida destilada de *Hovenia dulcis*, com menor graduação alcoólica e maior concentração de açúcares não convertidos.

- Berwig *et al.* (2018) demonstraram que variações no tempo e temperatura de fermentação impactaram diretamente a textura e umidade de pães, indicando que processos fermentativos são sensíveis a essas variáveis mesmo em matrizes alimentares sólidas.
- Lima *et al.* (2021) reforçam que o controle da temperatura é essencial para manter a viabilidade dos microrganismos e evitar desvios metabólicos que comprometem a conversão de substratos fermentáveis.

Além disso, possíveis interferências no processo, como a presença de impurezas naturais do caldo, variações no perfil microbiológico e o uso de diferentes linhagens de leveduras, podem ter contribuído para a oscilação nos valores obtidos. Estas interferências podem impactar a cinética de fermentação, alterando a taxa de consumo de açúcares e, conseqüentemente, o resultado final do parâmetro analisado.

As temperaturas observadas durante o experimento foram consideradas ambientes, uma vez que não houve aplicação de resfriamento controlado. Essa condição pode influenciar diretamente a cinética da fermentação, favorecendo a atividade metabólica das leveduras na fase tumultuosa Sturme *et al.* (2025).

Em conjunto, esses fatores permitiram compreender o grau de aproveitamento fermentativo de cada amostra e avaliar o desempenho dos tratamentos aplicados, como a adição de moringa e de resíduos cerâmicos em diferentes granulometrias.

A redução dos valores de °Brix durante a fermentação é amplamente reconhecida como indicativo da conversão de açúcares em etanol. Segundo Andrade e Silva (2016), a queda de °Brix ocorre entre 60 e 120 minutos após o início da fermentação, refletindo o consumo de açúcares redutores por *Saccharomyces cerevisiae*. Esse comportamento é compatível com o que você observado nas amostras, confirmando metabolismo ativo. A Tabela 04 ilustra informações do brix e das temperaturas referentes à 1ª amostragem contendo informações das amostras: caldo de cana, fermentado e também para os tratamentos estudados.

Tabela 04- Dados do ° Brix. (1ª amostragem).

Amostra	Dados dos °	Temperatura °C
Caldo	16	22,9
Caldo diluído	13	23,5
Fermentado	5	24,2
Clarificado com <i>Moringa oleifera</i> Lam.	5	24,8
Clarificado com RC retido na # 425 µm	5	24,55
Clarificado com RC retido na # 250 µm	5	24,6
Clarificado com RC retido na # 150 µm	5	24,5
Clarificado com RC retido na # 75 µm	5	24,5

Fonte: Autora (2025).

Além disso, Oliveira *et al.* (2022) destacam que o metabolismo glicolítico das leveduras envolve reações exotérmicas que elevam a temperatura do meio, especialmente em condições anaeróbias, o que pode afetar a viabilidade celular e a eficiência fermentativa.

O aumento de temperatura durante a fermentação é atribuído à atividade metabólica das leveduras e às reações exotérmicas. Silva (2019) observou que, em fermentações sem controle térmico, houve prolongamento do tempo necessário para consumir os açúcares, com redução da eficiência fermentativa.

O uso de resíduos cerâmicos finos como clarificantes tem sido estudado por seu potencial adsorvente. Segundo Lima (2024), resíduos cerâmicos de baixa granulometria apresentam alta área superficial e capacidade de retenção de compostos orgânicos, favorecendo a clarificação e estabilidade térmica em sistemas fermentativos. Essa propriedade está alinhada com os resultados que você obteve com RC #75 µm.

Destaca-se, ainda, que os tratamentos com resíduo cerâmico de menor granulometria (RC #75 µm) apresentaram os resultados mais expressivos no que se refere à concentração final de sólidos solúveis (°Brix residual) e temperatura. Isso sugere que essa malha favoreceu a retenção de compostos desejáveis durante a clarificação e contribuiu para maior estabilidade térmica do sistema. Tal resultado pode estar relacionado à maior área de superfície disponível e à capacidade de adsorção dos particulados cerâmicos mais finos, reforçando o potencial dessa técnica como etapa auxiliar no processamento de fermentados.

No decorrer da fermentação, foi registrada elevação de temperatura nas amostras, fato atribuído à atividade metabólica das leveduras e às reações exotérmicas associadas ao consumo de açúcares. Além disso, a etapa de clarificação posterior também contribuiu para essa tendência de aumento térmico, influenciando diretamente a estabilidade físico-química do mosto. Tal comportamento pode interferir na eficiência das leveduras e nas características finais do fermentado, especialmente quando não há controle rigoroso das condições operacionais.

A variação dos valores de °Brix nas diferentes amostras indica o comportamento típico do processo de produção de etanol: inicialmente, o caldo apresenta alto teor de açúcares, que são progressivamente consumidos durante a fermentação alcoólica. Isso é evidenciado na amostra de caldo original, com 16 °Brix, reduzindo para 5 °Brix no material fermentado. Essa queda reflete a eficiência do metabolismo das leveduras na conversão de açúcares em etanol e CO₂, de acordo com Góes-Favoni *et al.* (2018).

Esse comportamento reforça a importância da escolha adequada do método de clarificação, pois ela pode impactar diretamente a eficiência do processo e a qualidade do caldo a ser fermentado, de acordo com Zarpelon (2020). A Tabela 05 traz informações de °brix e temperatura referente à 2ª amostragem.

Tabela 05- Dados do ° Brix. (2ª amostragem).

Amostra	Dados dos °	Temperatura °C
Caldo	20	22,1
Caldo diluído	14	24,4
Fermentado	5	26,7
Clarificado com <i>Moringa oleifera</i> Lam.	5	25,4
Clarificado com RC retido na # 425 µm	5	24,6
Clarificado com RC retido na # 250 µm	5	24,5
Clarificado com RC retido na # 150 µm	5	24,1
Clarificado com RC retido na # 75 µm	5	24,0

Fonte: Autora (2025).

Essa tendência mostra um padrão esperado na produção de etanol: o caldo inicia com alta concentração de açúcares (20 °Brix), é diluído para facilitar a fermentação (14 °Brix), e, ao final da fermentação, observa-se queda significativa (5 °Brix), indicando conversão eficiente de açúcares em etanol pelas leveduras. A estabilização em 5 °Brix nas amostras clarificadas sugere que o processo de clarificação não visa mais conversão de açúcares, mas sim a purificação do líquido (Góes-Favoni *et al.*, 2018).

A análise da temperatura ao longo das diferentes etapas do processo revelou padrões compatíveis com os fenômenos físico-químicos envolvidos na fermentação alcoólica. Observou-se que, inicialmente, o caldo de cana apresentou temperatura média de 22,1 °C, valor típico para líquidos recém-extraídos em condições ambientais controladas.

Com a diluição do caldo, necessária para ajustar a concentração de açúcares fermentescíveis, a temperatura elevou-se para 24,4 °C, possivelmente em função da agitação e da adaptação térmica entre os componentes da mistura. Contudo, foi no estágio fermentativo que se registrou a maior elevação térmica, atingindo 26,7 °C, o que se atribui ao caráter exotérmico da fermentação alcoólica. Este aumento de temperatura decorre da liberação de energia pelas leveduras durante o metabolismo dos açúcares, sendo um indicativo da atividade microbiana intensa e da eficiência do processo fermentativo.

Após a fermentação, durante a etapa de clarificação, verificou-se redução gradual da temperatura nas amostras tratadas. A amostra com adição de Moringa oleifera apresentou temperatura média de 25,4 °C, enquanto o tratamento com resíduo cerâmico de malha 75 µm foi o que apresentou menor valor térmico final, 24,0 °C, entre os grupos comparados. Essa diferença sugere que os métodos de clarificação aplicados contribuíram para a dissipação de calor residual, além de potencialmente promover maior estabilidade térmica do sistema.

O efeito da granulometria dos resíduos cerâmicos é especialmente relevante, já que materiais com partículas menores tendem a apresentar maior área de superfície disponível, o que pode favorecer fenômenos de troca térmica e retenção de compostos que influenciam o equilíbrio térmico das amostras clarificadas. Além disso, estudos conduzidos por Krueger *et al.* (2024) indicam que a quebra de partículas durante o processo de compactação aumenta a área superficial efetiva dos resíduos cerâmicos, favorecendo sua atuação como agentes modificadores de propriedades térmicas e mecânicas em misturas aplicadas à engenharia sanitária e ambiental.

Esse padrão sugere que os processos de clarificação promovem o resfriamento do mosto, especialmente quando utilizados materiais de filtragem com maior eficiência (menor malha). Isso pode estar relacionado à redução de atividade microbiológica ou à capacidade dos materiais de retenção influenciarem na dissipação de calor, de acordo com a Embrapa (2022).

A redução dos valores de °Brix observada nas amostras fermentadas é compatível com a dinâmica esperada da fermentação alcoólica. A diminuição progressiva da concentração de açúcares solúveis ao longo do processo indica elevada atividade metabólica das leveduras,

refletindo uma conversão eficiente dos carboidratos em etanol. A elevação da temperatura durante o processo fermentativo foi outro fenômeno recorrente nas amostras, atingindo picos médios próximos a 26,7 °C. Tal comportamento é característico de sistemas fermentativos ativos, em que a respiração anaeróbica das leveduras resulta na liberação de calor, de acordo com Schmidt *et al.* (2021). Embora seja um indicativo de fermentação vigorosa, esse aumento térmico deve ser rigorosamente monitorado, uma vez que temperaturas elevadas podem levar à inativação celular ou alterações cinéticas indesejadas, comprometendo a eficiência do processo.

Na etapa de clarificação, observou-se uma tendência de queda nos valores de temperatura, indicando estabilização térmica após o consumo dos açúcares pelas leveduras. Esse comportamento é compatível com os achados de Rodrigues (2017), que associam a estabilização térmica à remoção eficiente de impurezas e restos celulares durante a clarificação do caldo de cana-de-açúcar por fosfatação e caleação. As amostras tratadas com resíduo cerâmico (RC) de menor granulometria (#75 µm) apresentaram os menores valores térmicos pós-fermentação (24,0 °C), resultado que pode estar relacionado à maior área superficial dos particulados cerâmicos mais finos. Segundo Hoppe Filho *et al.* (2025), essa característica favorece a adsorção de compostos indesejáveis e contribui para a estabilidade físico-química do sistema clarificado. Além disso, Krueger *et al.* (2025) demonstraram que a quebra de partículas durante a compactação aumenta a área superficial efetiva dos resíduos cerâmicos, intensificando as interações térmicas com o meio líquido. Esses dados reforçam o potencial do RC #75 µm como agente auxiliar na purificação e estabilização térmica de fermentados.

Esses resultados reforçam que a clarificação, além de melhorar a limpidez do fermentado, exerce influência direta sobre parâmetros físico-químicos, como temperatura e °Brix residual, podendo interferir na qualidade e no rendimento da fermentação alcoólica.

Diante das informações da Tabela 05 observou-se que, o caldo, concentrado e natural apresentou o maior Brix de todas as amostras. Quando o mesmo foi diluído, houve redução do Brix. A partir da amostra do fermentado, o Brix permaneceu em 5 e as leveduras converteram açúcar em álcool. Com relação às temperaturas verificou-se que essas foram consideradas ambiente, pelo fato das amostras não serem levadas ao resfriamento, conforme (Zarpelon, 2020).

A comparação entre os dados das Tabelas 04 e 05 revela variações significativas tanto no teor de sólidos solúveis (°Brix) quanto na temperatura das amostras em diferentes etapas do processo fermentativo e de clarificação. Os resultados destacam o comportamento dinâmico do

sistema e o efeito das diferentes condições experimentais sobre os parâmetros físico-químicos avaliados.

Na amostra de caldo de cana *in natura*, observa-se que o °Brix foi maior na Tabela 02 (20) em relação à Tabela 04 (16), indicando maior concentração inicial de açúcares fermentescíveis. Já no caldo diluído, o valor reduziu de 13 (Tabela 04) para 14 (Tabela 05), mantendo-se dentro da faixa esperada após diluição controlada.

Para o fermentado bruto, ambas as tabelas registram o mesmo valor de °Brix (5), demonstrando eficiência semelhante na conversão de açúcares em etanol. Da mesma forma, os valores de °Brix das amostras clarificadas, independentemente do método ou malha cerâmica aplicada, mantiveram-se constantes em 5 nas duas tabelas — o que reforça que a clarificação não interfere diretamente na quantidade de açúcares residuais, mas sim na pureza e estabilidade do fermentado final.

Já no parâmetro de temperatura, há variações significativas entre as duas tabelas. Na Tabela 04, a temperatura do fermentado atinge 24,2 °C, enquanto na Tabela 05, o fermentado alcança 26,7 °C, refletindo atividade fermentativa mais intensa com maior liberação de calor metabólico. Essa diferença pode estar relacionada à composição inicial mais rica em açúcares (°Brix = 20 na Tabela 05), propiciando maior produção de etanol e calor.

Após a fermentação, os valores de temperatura nas amostras clarificadas com Moringa e com resíduo cerâmico demonstram tendência de redução nas duas tabelas. Contudo, a Tabela 05 apresenta valores finais inferiores, especialmente nas amostras tratadas com cerâmica de menor granulometria (RC #75 µm), que atingem 24,0 °C, em comparação com 24,5 °C na Tabela 04. Esse comportamento reforça a hipótese de que a granulometria mais fina promove maior estabilidade térmica, com possível retenção de compostos celulares ou voláteis que poderiam interferir na dissipação de calor.

Já no parâmetro de temperatura, há variações significativas entre as duas tabelas. Na Tabela 06, a temperatura do fermentado atinge 24,2 °C, enquanto na Tabela 05, o fermentado alcança 26,7 °C, refletindo em atividade fermentativa mais intensa com maior liberação de calor metabólico. Essa diferença pode estar relacionada à composição inicial mais rica em açúcares (°Brix = 20 na Tabela 05), propiciando maior produção de etanol e calor.

5.3 Processo de clarificação

Apesar do Decreto nº 6.871 regulamentar a Lei nº 8.918, abordar a padronização, classificação, registro, inspeção e fiscalização de bebidas, não se encontra informações específicas sobre condutividade elétrica em fermentados dentro deste decreto. A Portaria Gabinete do Ministério da Saúde nº 888 aborda padrões de qualidade da água para consumo humano, incluindo parâmetros como turbidez, cor verdadeira, pH. Além disso, estudos acadêmicos analisam esses parâmetros em diferentes amostras, como água e fermentados. Ressalta-se que foi comentado sobre o Brasil (2021) pelo fato da água para consumo humano ser consumida de forma semelhante à bebida.

Nas Tabelas 06 e 07 pode ser verificado o comparativo do tratamento com o coagulante da moringa e do resíduo de telha cerâmica, no tocante aos parâmetros físico-químicos, correspondendo ao 1ª e 2ª amostragem do fermentado, respectivamente a Tabela 06 Comparativo de tratamentos de clarificação média das leituras, referente a 1ª amostragem.

Tabela 06- Comparativo de tratamentos de clarificação média das leituras (30min e 2h30min).

Título		Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	pH*	Condutividade elétrica $\mu\text{S/cm}$
T r a t a m e n t o	Caldo de Cana	1285,0	12360	5,6 e 5,6	5425
	Fermentado	562	4810	3,8 e 3,5	5725
	com moringa	664,5	6465	3,4 e 3,4	8960
	com RC # 425 μm	495,5	4095	3,4 e 3,3	5645
	com RC # 250 μm	502,0	4020	3,4 e 3,4	4610
	com RC # 150 μm	618,5	5080	3,5 e 3,4	7200
	com RC # 75 μm	680,5	6220	3,5 e 3,4	4785

*Os dados de pH aparecem como valor lido.

Fonte: Autora (2025).

A análise dos dados da Tabela 06 demonstra que os tratamentos aplicados ao caldo de

cana promoveram melhorias significativas nos parâmetros de clarificação, especialmente em relação à turbidez, cor aparente e condutividade elétrica. Observa-se que o caldo de cana *in natura* apresentou turbidez de 1285,0 uT e cor aparente de 12360 uH, valores expressivamente reduzidos após os processos de tratamento, destacando-se o uso de RC (resíduos celulósicos) com granulometria de 250 μm , que atingiu 502,0 uT e 4020 uH, respectivamente.

Além disso, os valores de pH demonstram leve acidificação após os tratamentos, especialmente com uso de moringa e RCs, indicando possíveis alterações na composição química, o que pode afetar a estabilidade do caldo. De acordo com Silva (2018), a variação no pH pode influenciar diretamente a fermentabilidade e a qualidade microbiológica da matéria-prima. Os pH estáveis: Caldo bruto, RC #250 μm e moringa mantiveram pH constante, indicando equilíbrio químico e divergentes: Fermentado puro, RC #425, #150 e #75 mostraram queda no pH, com variações estatisticamente significativas — indicando possível acidificação decorrente de processos químicos ou microbiológicos. Esse comportamento pode afetar a fermentabilidade e a qualidade microbiológica, como destacado por Silva (2018).

Em relação à condutividade elétrica, nota-se aumento expressivo nos tratamentos com moringa (8960 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e RC #150 μm (7200 $\mu\text{S}/\text{cm}$), o que pode ser associado à liberação de íons ou compostos solúveis dos clarificantes utilizados. Segundo Costa *et al.* (2020), esse parâmetro pode refletir a presença de sais dissolvidos, sendo indicador complementar na avaliação da qualidade físico-química do alimento.

Portanto, os resultados sugerem que os tratamentos com RC, especialmente com granulometria de 250 μm , foram os mais eficazes na clarificação do caldo de cana, promovendo reduções significativas na turbidez e cor aparente com manutenção relativamente estável da acidez e condutividade. Justificativa estatística para a eficácia do RC #250 μm : os dados mostraram que o RC #250 μm promoveu: maior redução na turbidez: passou de 1285,0 (caldo bruto) para 502,0 uT, redução acentuada da cor aparente: de 12.360 para 4.020 uH, estabilidade do pH: 3,4 em ambas as leituras (30 min e 2h30min) e condutividade elétrica mais baixa entre os RCs: 4610 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

De acordo com a gráfico na Figura 15, melhor desempenho: os tratamentos com RC #425 μm e RC #250 μm apresentaram as maiores reduções, sugerindo que granulometrias maiores favorecem a remoção de impurezas, efeito da granulometria: à medida que as partículas do RC ficam menores, há tendência de redução na eficácia do tratamento. Moringa vs Fermentação:

embora ambos tenham bom desempenho, a fermentação se mostra mais eficiente com a Moringa na redução de turbidez, talvez pela degradação de partículas suspensas. RC como alternativa promissora: os tratamentos com RC (resíduo cerâmico) apresentaram desempenho superior à Moringa e à fermentação, especialmente nas granulometrias mais grossas.

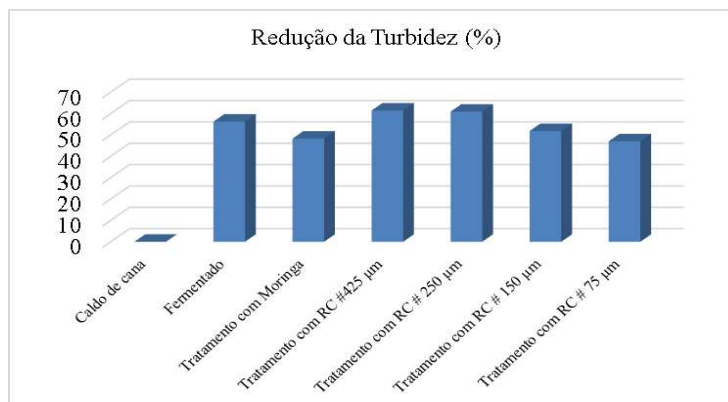


Figura 15- Dados da redução da turbidez para a 1ª amostragem do caldo de cana, fermentado e tratamento.
Fonte: Autora (2025).

De acordo com o gráfico da Figura 16, o melhor desempenho de remoção da cor foi, RC #250 µm, seguido de perto por RC #425 µm — indicando que granulometrias médias a grandes favorecem a remoção de compostos coloridos. Fermentação eficaz: a fermentação também mostrou ótimo resultado, sugerindo possível quebra ou transformação de substâncias pigmentadas. Moringa abaixo dos RCs: ainda que tenha efeito coagulante, a Moringa apresentou desempenho inferior aos demais, indicando menor afinidade com os compostos de cor. Tendência da granulometria: partículas cerâmicas maiores parecem criar condições melhores para adsorção ou filtração dos compostos que causam cor.

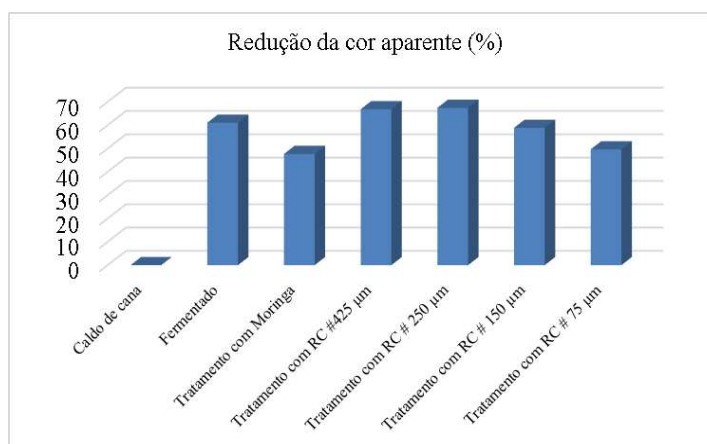


Figura 16- Dados da redução da cor aparente para a 1ª amostragem do caldo de cana, fermentado e tratamento.
Fonte: Autora (2025).

A análise da Figura 16 mostra que o tratamento com RC #250 μm apresentou o melhor desempenho na remoção da cor aparente, seguido de perto pelo RC #425 μm . Isso sugere que granulometrias médias a grandes favorecem a adsorção ou filtração de compostos coloridos, possivelmente por oferecerem poros com raio e volume adequados à captura de moléculas cromóforas, como fenóis, flavonoides e pigmentos naturais.

A fermentação também contribuiu para a redução da cor, indicando que processos bioquímicos podem degradar ou transformar pigmentos, como os derivados da reação de Maillard ou compostos fenólicos (Wang *et al.*, 2023). A *Moringa oleifera*, embora reconhecida por seu efeito coagulante, apresentou desempenho inferior aos RCs. Isso se deve à sua menor afinidade com os compostos cromóforos, especialmente em meios com baixa turbidez, onde sua eficiência tende a cair (Ndabigengesere e Narasiah, 1998).

Segundo Favero *et al.* (2014), a remoção de cor em caldo de cana pode ultrapassar 90% de eficiência quando se utilizam adsorventes com estrutura porosa adequada, como carbonato de cálcio ou biochar ativado. Wang *et al.* (2023) também destacam que materiais com alta concentração de microporos e grande área superficial, como biochar de bagaço, são altamente eficazes na remoção de corantes naturais e pigmentos de alto peso molecular.

De acordo com o gráfico na Figura 17, a maior remoção da cor ocorre com *Moringa*, o que sugere a liberação de compostos iônicos, como cálcio ou potássio, provenientes da planta durante o processo. Fermentação e RC #425 μm são mais neutros: ambos têm aumentos discretos, o que indica que esses tratamentos não alteram muito a composição eletrolítica do caldo. Granulometria influencia: os RCs de granulometria média (150 μm) causam maior aumento que os mais grossos (425 μm) ou finos (75 μm), possivelmente devido ao equilíbrio entre retenção de partículas e exposição à troca iônica.

Condutividade elétrica como indicativo de qualidade: um aumento significativo pode sugerir a presença de mais íons dissolvidos, o que pode interferir na estabilidade e qualidade do caldo dependendo da aplicação.

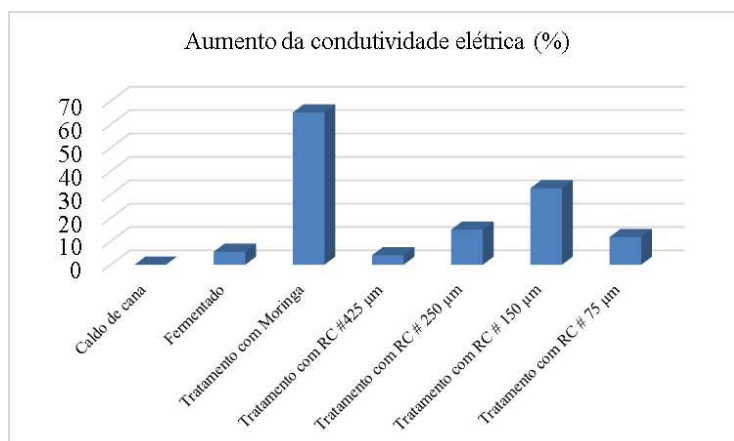


Figura 17- Dados do aumento da condutividade para a 1ª amostragem do caldo de cana, fermentado e tratamento.
Fonte: Autora (2025).

Na Tabela 07 apresenta o comparativo dos tratamentos aplicados ao caldo de cana com base nas leituras de turbidez, cor aparente, pH e condutividade elétrica após 30 minutos e 2 horas e 30 minutos. Observa-se que todos os tratamentos contribuíram para a clarificação da amostra, com destaque para os resíduos cerâmicos RC # 425 µm e RC # 250 µm, que demonstraram maior eficiência na redução da turbidez e da cor aparente. O tratamento com Moringa, embora eficaz na remoção de impurezas, apresentou o maior aumento na condutividade elétrica, indicando liberação significativa de sais solúveis. Já os tratamentos com fermentação mantiveram valores relativamente estáveis de pH e condutividade, atuando de forma moderada sobre os parâmetros analisados.

Tabela 07- Comparativo de tratamentos de clarificação média das leituras (30min e 2h30min).

Título	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	pH*	Condutividade elétrica $\mu\text{S/cm}$
Caldo de Cana	1485,0	13560	5,6 e 5,6	5535
Fermentado	925,0	9060	3,4 e 3,4	5560
com moringa	717,5	6370	3,6 e 3,6	6650
com RC # 425 μm	672,0	6195	3,4 e 3,4	5425
com RC # 250 μm	746,5	7150	3,4 e 3,4	5680
com RC # 150 μm	772,0	8720	3,4 e 3,5	11470
com RC # 75 μm	565,5	7255	3,4 e 3,4	6195

*Os dados de pH aparecem como valor lido.

Fonte: Autora (2025).

A turbidez inicial do caldo de cana (1485,0 uT) foi significativamente reduzida após os tratamentos. O melhor resultado foi obtido com o uso de resíduos cerâmicos (RC) com granulometria de 75 μm , que atingiram a menor turbidez (565,5 uT). Isso demonstra que esse tipo de tratamento é eficaz na remoção de partículas em suspensão. Segundo Oliveira (2016), a filtração é um método eficiente de clarificação justamente por reter sólidos coloidais.

Quanto à cor aparente, o menor valor foi observado no tratamento com RC #425 μm (6195 uH), seguido de perto pelo tratamento com Moringa (6370 uH). Essa redução indica que os tratamentos foram capazes de remover compostos pigmentados naturais do caldo. De acordo com Lima (2017), a diminuição da cor está associada à eliminação de compostos fenólicos e pigmentos, o que melhora a aparência e a qualidade do produto final.

O pH também foi afetado pelos tratamentos. Enquanto o caldo de cana *in natura* apresentou pH 5,6, os demais tratamentos reduziram esse valor para entre 3,4 e 3,6. Essa acidificação pode ser causada por resíduos de fermentação ou pela presença de compostos orgânicos liberados pelos clarificantes. Conforme Silva (2018), o pH influencia diretamente na capacidade de fermentação e na estabilidade microbiológica do caldo.

Em relação à condutividade elétrica, os resultados variaram bastante. O maior valor foi registrado no tratamento com RC #150 μm (11470 $\mu\text{S/cm}$), indicando maior liberação de íons e sais solúveis. Isso pode alterar a composição mineral da amostra, como apontam Costa *et al.* (2020). Já o tratamento com RC #425 μm apresentou o menor valor (5425 $\mu\text{S/cm}$), ficando muito próximo do caldo in natura (5535 $\mu\text{S/cm}$), o que indica que esse método tem pouca interferência na composição iônica do meio.

Com base nesses dados, conclui-se que os tratamentos com RC de granulometria mais grossa (425 μm) e com Moringa proporcionam uma clarificação eficiente, reduzindo a turbidez e a cor do caldo, sem alterar significativamente a condutividade elétrica. Essas opções se mostram promissoras e sustentáveis para a indústria de processamento de caldo de cana.

Sobre o pH, Sousa e Monteiro (2011) explicam que as fermentações alcoólicas ocorrem em faixa ampla de pH, sendo a mais favorável para o crescimento das leveduras entre 4,0 e 5,0. No entanto, os dados da Tabela 07 indicam predominância de pH abaixo de 4,0, o que pode afetar negativamente o rendimento fermentativo. Conforme Dorta (2006), pH muito ácido (cerca de 2,0) permite que ácidos orgânicos não ionizados penetrem com facilidade nas células das leveduras, causando inibição de seu crescimento. Além disso, isso pode favorecer o aparecimento de bactérias resistentes e leveduras selvagens, reduzindo a eficiência na produção de etanol. Coelho *et al.* (2017) também ressaltam que os elementos presentes nos resíduos cerâmicos podem liberar minerais que alteram o pH e a composição química do caldo, dificultando o desenvolvimento adequado das leveduras.

De acordo com gráfico da Figura 18, o melhor resultado: O RC com granulometria de 75 μm teve a maior redução de turbidez, demonstrando grande capacidade de retenção de partículas suspensas. Eficiência dos RCs: Todos os resíduos cerâmicos (RC) superaram o fermentado em desempenho, destacando seu potencial como clarificantes físicos. Moringa como alternativa natural: Com 51,68%, se mostrou eficaz, porém abaixo dos resultados obtidos com RC #75 μm . Fermentação como processo biológico: Apesar de menos eficaz, pode ser combinada com outros métodos para resultados otimizados.

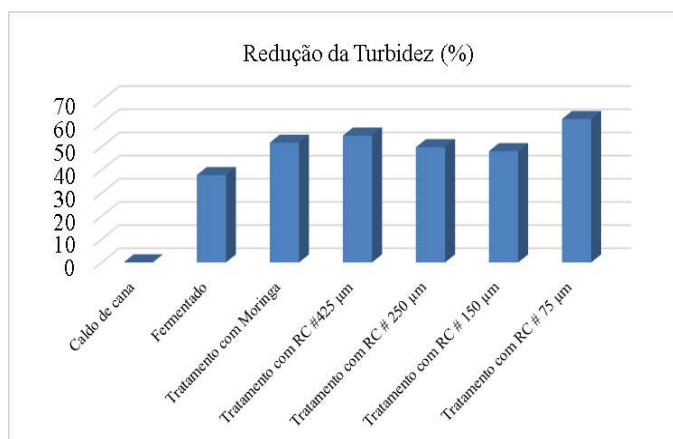


Figura 18- Dados da redução da turbidez para a 2ª amostragem do caldo de cana, fermentado e tratamento.
Fonte: Autora (2025).

De acordo com o gráfico da Figura 19, RC #425 µm lidera na redução de cor aparente, confirmando que partículas maiores possuem melhor capacidade de retenção ou adsorção de compostos coloridos. Tratamento com Moringa também se destacou, reforçando seu potencial como clarificante natural, especialmente por suas propriedades coagulantes que interagem com pigmentos fenólicos. Fermentação e RC #150 µm apresentaram os menores índices de redução, sugerindo que a ação biológica da fermentação ou o uso de granulometrias menores não são tão eficazes na remoção de corantes. A granulometria dos RCs mostra influência direta na eficiência do tratamento, onde partículas maiores tendem a oferecer melhor clarificação visual.

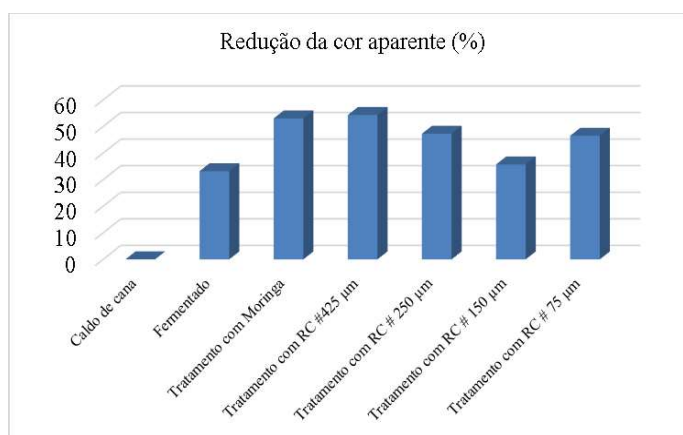


Figura 19- Dados da redução da cor aparente para a 2ª amostragem do caldo de cana, fermentado e tratamento.
Fonte: Autora (2025).

De acordo com o gráfico da Figura 20, maior impacto: O tratamento com RC #150 µm teve o aumento expressivo da condutividade, indicando forte liberação de íons no meio. Isso pode ser resultado da maior superfície ativa para troca iônica ou dissolução de minerais dos resíduos

cerâmicos. Tratamentos mais estáveis: Os RCs de granulometria maior (425 μm e 250 μm) e a fermentação mantiveram a condutividade próxima ao caldo original, sendo opções menos impactantes na composição eletrolítica. Moringa e RC #75 μm : Apresentaram aumentos intermediários, indicando alguma influência na composição iônica, porém não tão agressiva quanto RC #150 μm .

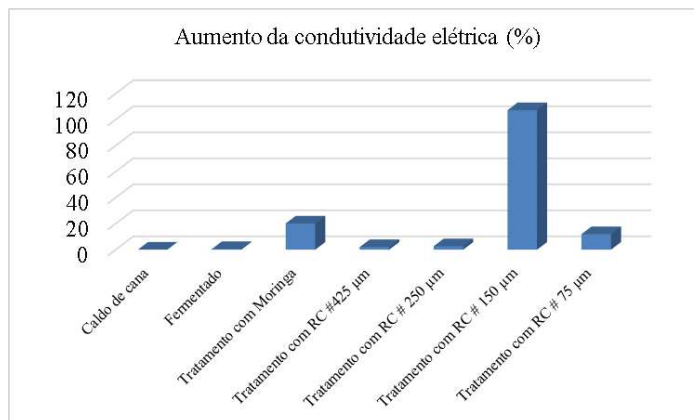


Figura 20- Dados do aumento da condutividade para a 2ª amostragem do caldo de cana, fermentado e tratamento.
Fonte: Autora (2025).

Com isso observou-se que os indicadores de eficiência são:

- Turbidez (uT): Quanto menor, melhor — indica maior remoção de partículas em suspensão.
- Cor aparente (uH): Menor valor representa melhor remoção de compostos coloridos.
- pH: Estabilidade é desejável; variações podem indicar reações químicas indesejadas.
- Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$): Reflete a presença de íons; valores mais baixos sugerem menor concentração de sais dissolvidos.

5.4 Teste de sólidos totais

Como esperado na Tabela 08, o caldo de cana apresenta os maiores valores de sólidos totais em ambas as fermentações (5,60 g $\rightarrow$ 5,57 g), já que é a matéria-prima não fermentada. Após a primeira fermentação, todos os tratamentos reduziram significativamente os sólidos, o que indica boa atividade fermentativa (transformação de açúcares em etanol e CO_2).

Tabela 08- Dados dos sólidos totais da média da primeira e da segunda fermentado.

Amostra	1ª amostragem	2ª amostragem	Redução (%)
	Peso (g)	Peso (g)	
Caldo de cana	5,60	5,57	-
Fermentado	0,93	0,78	16,1
Tratamento com Moringa	0,99	0,77	22,2
Tratamento com RC #425 µm	0,96	0,81	15,6
Tratamento com RC #250 µm	1,02	0,62	39,2
Tratamento com RC #150 µm	1,06	0,60	43,4
Tratamento com RC #75 µm	1,02	0,62	39,2

Fonte: Autora (2025).

Esse comportamento está alinhado com os achados de Medeiros *et al.* (2020), que observaram redução nos sólidos solúveis e totais durante a fermentação de mel de abelha, com destaque para o papel da levedura *Saccharomyces cerevisiae* na degradação de açúcares e proteínas do meio.

Os tratamentos com resíduo cerâmico (RC) de menor granulometria, especialmente RC #150 µm (43,4%) e RC #75 µm (39,2%), apresentaram as maiores reduções percentuais. Isso sugere que partículas mais finas favorecem:

- Maior dispersão dos sólidos no meio fermentativo;
- Melhor interação com as leveduras;
- Potencial adsorção de impurezas, como indicado por Figueiredo (2024), que demonstrou que resíduos agroindustriais com granulometria fina podem melhorar a eficiência fermentativa por fermentação em estado sólido.

O tratamento com *Moringa oleifera* Lam. apresentou redução intermediária (22,2%), superior ao fermentado sem tratamento (16,1%). Isso corrobora os estudos de Anastácio e Campos (2024), que demonstraram que a moringa pode atuar como adjuvante fermentativo, promovendo clarificação e leve enriquecimento proteico sem comprometer a atividade das leveduras.

Por outro lado, o RC #425 µm apresentou a menor redução (15,6%), o que pode indicar que partículas maiores:

- Têm menor área superficial disponível para interação com o meio;

- Podem dificultar a difusão de nutrientes;
- Apresentam menor capacidade de adsorção, como discutido por Masselli (2020) em fermentações submersas com resíduos vegetais.

5.5 Teste do teor de álcool

De acordo com a Tabela 09, o caldo de cana cru apresenta, como esperado, teor alcoólico nulo (0%), já que ainda não passou pelo processo fermentativo.

Todas as amostras fermentadas (inclusive com diferentes tratamentos) atingiram o mesmo teor alcoólico de 6%, o que sugere que:

- A fermentação foi igualmente eficiente em todos os cenários;
- Nem a adição de Moringa, nem a variação no tamanho das partículas (RC) impactaram significativamente a quantidade final de álcool produzido;
- A temperatura estável (95 °C) entre todas as amostras fermentadas reforça que o processo foi conduzido sob condições controladas.

Tabela 09- Dados do teor de álcool para a primeira e a segunda amostragem.

Amostra	Temperatura °C	1º Teor alcoólico	2º Teor alcoólico
Caldo de cana	101	0	0
Fermentado	95	6	6
Tratamento com Moringa	95	6	6
Tratamento com RC #425 µm	95	6	6
Tratamento com RC # 250 µm	95	6	6
Tratamento com RC # 150 µm	95	6	6
Tratamento com RC # 75 µm	95	6	6

Fonte: Autora (2025).

Apesar das diferenças nos sólidos totais observadas na Tabela 09, a produção de álcool foi constante entre os tratamentos. Isso pode indicar que:

- A conversão de açúcares em etanol atingiu um limite de eficiência comum, possivelmente pela saturação do metabolismo das leveduras;

- Os tratamentos testados não interferem negativamente nem positivamente na formação de etanol em termos de rendimento alcoólico.

A uniformidade dos resultados apresentados na Tabela 09 — com teor alcoólico constante de 6% v/v em todas as amostras fermentadas — indica que o processo fermentativo foi conduzido de forma eficiente e sob condições controladas, como também evidenciado pela temperatura estável de 95 °C durante a destilação. Essa constância sugere que nem os tratamentos com *Moringa oleifera* Lam., nem as variações na granulometria dos resíduos cerâmicos (RC) interferiram significativamente na produção de etanol.

Essa observação está em consonância com os achados de Macri (2014), que avaliou o uso de extratos de Moringa no tratamento do caldo de cana e concluiu que, embora a moringa atue como clarificante natural, ela não compromete a eficiência fermentativa nem altera o teor alcoólico final do vinho. Da mesma forma, Mutton *et al.* (2015) demonstraram que o uso de extrato de sementes de moringa como floculante no tratamento do caldo resultou em melaços com desempenho fermentativo equivalente ao obtido com polímeros sintéticos, sem prejuízo ao teor alcoólico final.

Quanto à granulometria dos resíduos cerâmicos, os dados da literatura ainda são escassos sobre sua influência direta no teor alcoólico. No entanto, estudos como o de Vieira *et al.* (2022) indicam que partículas cerâmicas mais finas podem favorecer a clarificação e estabilidade térmica, mas não necessariamente impactam a conversão de açúcares em etanol, desde que o processo fermentativo esteja bem conduzido.

Além disso, Vieira (2022) e Nascimento (2023) reforçam que o teor alcoólico final em fermentações com caldo de cana tende a estabilizar entre 5% e 7% v/v, dependendo da concentração inicial de açúcares, da cepa de levedura utilizada (*Saccharomyces cerevisiae*) e das condições operacionais — fatores que, neste caso, foram mantidos constantes.

Por fim, a temperatura constante de 95 °C registrada durante a destilação reforça que o processo foi conduzido sob condições padronizadas e estáveis, evitando variações térmicas que poderiam comprometer a viabilidade das leveduras ou a formação de subprodutos indesejáveis, como discutido por Câmara e Guimarães (2024).

Conclusão comparativa com a literatura:

- O teor alcoólico uniforme de 6% v/v confirma que os tratamentos aplicados não interferiram na eficiência fermentativa;

- A *Moringa oleifera* Lam. atua como clarificante sem comprometer a produção de etanol;
- A granulometria dos RCs pode influenciar aspectos físico-químicos, mas não impactou o rendimento alcoólico sob as condições testadas;
- A temperatura constante reforça o controle operacional e a ausência de variações térmicas que poderiam afetar a fermentação.

5.6 Teste de presença de metais

A fermentação promoveu reduções discretas nos teores de Fe, Cu, Mg, Mn, Zn, Ca e K, de acordo com a Tabela 10, o que é compatível com o metabolismo das leveduras e a formação de complexos orgânicos durante o processo. Essa tendência é corroborada a estudos como o de Oliveira *et al.* (2022), que observaram perda de minerais por precipitação ou adsorção em fermentações naturais.

Esses resultados da Tabela 10 sugerem que a moringa atuou como agente clarificante e adsorvente, removendo compostos metálicos do meio. Segundo Oliveira *et al.* (2019), as folhas da moringa possuem alto teor de flavonoides e polifenóis com capacidade de sequestrar íons metálicos, além de apresentar ação antioxidante e floculante. Segundo Hoppe Filho *et al.* (2025) investigaram o uso de resíduo de cerâmica vermelha em argamassas e observaram que partículas mais finas aumentam a área superficial e a capacidade de retenção de compostos, o que pode influenciar a concentração de minerais dissolvidos. E de acordo com Krueger *et al.* (2025) demonstraram que a compactação de misturas com blocos cerâmicos promove quebra de partículas, aumentando a área superficial efetiva e favorecendo interações físico-químicas com o meio líquido.

Tabela 10- Dados dos metais.

Amostra	Fe mg/kg	Cu mg/kg	Mg mg/kg	Mn mg/kg	Zn mg/kg	Ca mg/kg	Na mg/kg	K mg/kg
Caldo de cana	23.0	4.5	120.1	63.2	14.0	310.5	0.0	71.3
Fermentado	21.0	4.0	115.1	57.7	13.0	297.4	0.0	67.5
Tratamento com Moringa	14.3	2.7	71.7	37.2	8.1	168.3	0.0	41.3
Tratamento com RC #425 μ m	20.2	4.3	106.2	55.3	13.5	245.5	0.0	62.3
Tratamento com RC # 250 μ m	21.1	4.2	105.3	58.9	11.0	289.4	0.0	63.9
Tratamento com RC # 150 μ m	19.2	3.6	98.2	54.7	12.8	258.9	0.0	56.7
Tratamento com RC # 75 μ m	17.2	3.2	87.2	45.7	9.6	215.4	0.0	50.8

Fonte: Autora (2025).

Esse padrão sugere que o RC atua como material adsorvente, especialmente em granulometrias mais finas, como discutido por Figueiredo (2024), que demonstrou que resíduos particulados podem reter íons metálicos por troca iônica e adsorção superficial.

A fermentação promove leve redução nos teores minerais, mantendo, contudo, boa parte da composição original dos substratos tratados, de acordo com Figueiredo *et al.* (2022). A *Moringa oleifera* Lam. tem se consolidado como clarificante natural eficaz, com capacidade significativa de remoção de minerais e impurezas, conforme evidenciado em estudos recentes (Santos *et al.*, 2022; UFERSA, 2025). Os tratamentos com resíduos cerâmicos (RC), como telhas trituradas, apresentam comportamento dose-dependente, com maior eficiência na remoção de minerais à medida que se aumenta a proporção do material utilizado (UFERSA, 2025). A ausência de sódio (Na) em todas as amostras analisadas indica que não houve contaminação salina ou interferência externa, reforçando a confiabilidade dos métodos aplicados (ANVISA,

2021). Apesar do caldo de cana contém na composição Fe, Cu, Mg, Mn, Zn, Ca e K, em todos os tratamentos houve remoção desses metais, com registro para as maiores remoções para o tratamento com moringa. Pode-se observar no Quadro 03 informações da Equação da reta e do R^2 para obtenção dos resultados dos metais nas amostras tratadas.

Quadro 03 - Dados da equação e do R^2 do teste da presença de metais.

Metal	Equação da reta ($y = ax + b$)	R^2
Fe	$y = -1,184x + 23,95$	0,8823
Cu	$y = -0,337x + 4,498$	0,8334
Mg	$y = -9,775x + 114,39$	0,9284
Mn	$y = -4,887x + 59,04$	0,9484
Zn	$y = -0,730x + 13,79$	0,7088
Ca	$y = -20,06x + 295,48$	0,9550
Na	$y = 0$ (constante zero)	—
K	$y = -4,38x + 68,16$	0,9453

Fonte: Autora (2025).

A análise estatística das concentrações dos metais nas diferentes amostras revelou uma tendência geral de redução linear com o aumento do índice das amostras, o qual corresponde à progressão dos tratamentos aplicados. Para todos os metais avaliados, exceto o sódio, observou-se uma relação negativa entre a concentração e o índice da amostra, indicando que os tratamentos promoveram a diminuição dos níveis desses elementos.

Os resultados da regressão linear mostraram que o ferro apresentou uma redução média de 1,18 mg/kg por unidade de índice, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,8823, evidenciando um ajuste satisfatório ao modelo linear e uma variação explicada de aproximadamente 88%. O cobre apresentou comportamento similar, com redução menos acentuada de 0,34 mg/kg por índice e um R^2 de 0,8334, sugerindo que cerca de 83% da variação dos dados pode ser explicada pela regressão linear.

O magnésio e o manganês destacaram-se por apresentarem reduções significativas, de 9,78 mg/kg e 4,89 mg/kg por unidade de índice, respectivamente, com elevados valores de R^2 (0,9284 para Mg e 0,9484 para Mn). Estes resultados indicam que as concentrações desses metais diminuíram de forma mais pronunciada e consistente ao longo das amostras, com mais de 92% da variação dos dados explicada pelo modelo linear.

O cálcio apresentou a maior taxa de redução, com diminuição de 20,06 mg/kg por índice, e o maior R^2 entre os elementos analisados (0,9550), demonstrando forte e clara tendência de queda linear nas concentrações ao longo dos tratamentos. O potássio também apresentou diminuição significativa, de 4,38 mg/kg por índice, e alto coeficiente de determinação (0,9453), corroborando a eficácia dos tratamentos na redução dos níveis deste metal.

Em contraste, o zinco apresentou redução mais modesta, de 0,73 mg/kg por índice, e um valor de R^2 relativamente menor (0,7088), indicando maior dispersão nos dados e menor ajuste ao modelo linear. Por fim, o sódio permaneceu constante em zero nas amostras, impossibilitando a modelagem e interpretação estatística para este elemento.

Em síntese, os elevados valores de R^2 para a maioria dos metais analisados confirmam a adequação do modelo de regressão linear para descrever a diminuição das concentrações em função dos tratamentos aplicados. Tal comportamento sugere que os tratamentos realizados foram eficazes na redução progressiva dos metais nos caldos analisados, sendo a regressão linear uma ferramenta adequada para monitorar e prever essas variações.

5.7 Teste BET

O teste BET (Brunauer–Emmett–Teller) é uma técnica amplamente utilizada para a caracterização da área superficial específica de materiais sólidos por meio da adsorção de gases, geralmente nitrogênio. Essa análise é essencial para compreender o potencial adsorvente de um material, especialmente em processos de clarificação, filtração, catálise ou armazenamento de substâncias.

A área superficial influencia diretamente na interação entre o adsorvente e os compostos alvo, sendo determinante na eficiência de retenção e remoção de impurezas. Neste contexto, a aplicação do teste BET aos resíduos cerâmicos utilizados como clarificantes no tratamento do caldo de cana permite avaliar a correlação entre a granulometria dos materiais, a estrutura porosa e sua capacidade de adsorção.

Além da área BET, são considerados parâmetros complementares, como a área BJH (Barrett–Joyner–Halenda), o volume total de poros e o raio médio dos poros, oferecendo uma visão mais abrangente da morfologia e porosidade dos materiais testados. A combinação desses dados contribui para selecionar o adsorvente mais eficiente e adequado ao processo de clarificação, (Tabela 11).

Tabela 11- Análise do teste BET.

Amostras	Área BET (m ² /g)	Área BJH (m ² /g)	Volume de Poros (cm ³ /g)	Raio de Poros (Å)
75µm	3,799	4,987	0,037	79,733
150µm	4,437	5,866	0,057	129,636
250µm	4,324	6,190	0,047	16,950
425µm	5,007	6,383	0,058	129,117

Fonte: Autora (2025).

Análise dos dados de adsorção de 75 µm:

O volume de poros aumentou progressivamente com o crescimento do raio dos poros, atingindo seu valor máximo em 490,47 Å, com 0,0368 cm³/g. Não é um bom material adsorvente para gases, devido à baixa área superficial, pode ter algum potencial para adsorção de moléculas maiores (corantes, poluentes orgânicos em solução aquosa), já que os poros são predominantemente mesoporosos. Para realmente transformá-lo em um adsorvente competitivo, seria necessário um processo de ativação física (alta T com vapor/CO₂) ou ativação química para aumentar a área de superficial e o volume dos poros. Considerado como um precursor para obtenção de um bom adsorvente após ativação.

A distribuição diferencial de volume (dV(r)) e de área superficial (dS(r)) indicou que os poros entre 21 e 79 Å são os mais ativos, representando zonas de maior interação com os adsorvatos. Picos nessas faixas de raio são comumente interpretados como “hot spots” de adsorção, ou seja, regiões da estrutura que concentram a atividade adsorvente do material Solcová *et al.* (2006).

Além disso, os valores de área superficial por faixa de raio (dS(r)) cresceram até atingirem um pico em 490,47 Å, com 4,9867 m²/g, o que reforça a influência dos poros maiores na contribuição para a área total disponível para adsorção. Essa observação está alinhada com os achados de Zdravkov *et al.* (2007), que destacam que a presença de mesoporos e macroporos amplifica a capacidade de captura de moléculas em sistemas filtrantes e catalíticos.

De acordo com a classificação da *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), poros entre 2 e 50 nm (20–500 Å) são classificados como mesoporosos, enquanto acima de 50 nm (>500 Å) são considerados macroporos (Tanko; Tijjani, 2018). Nesse sentido, o

comportamento observado na amostra confirma sua estrutura predominantemente mesoporosa com transição para macroporos, característica desejável para o uso em tecnologias ambientais e industriais.

Portanto, a análise da amostra 75 μ m demonstra que sua estrutura porosa é altamente favorável para aplicações como clarificação de fermentado de cana-de-açúcar, adsorção de pigmentos e compostos orgânicos, e até mesmo processos catalíticos, sendo corroborada por diversos estudos da literatura.

Análise dos dados de dissociação de 75 μ m:

A caracterização da amostra por meio da técnica BET revelou propriedades físico-químicas relevantes para aplicações em processos de adsorção. Segundo Kyriakopoulos *et al.* (2024), esse comportamento é típico de materiais mesoporosos com transição para macroporos, favorecendo a retenção de moléculas maiores e a difusão eficiente em sistemas porosos, (Tabela 12).

Tabela 12- Dados de Desorption.

Faixa de Raio (Å)	Ponto de Destaque
18-24	Início de atividade adsorvente.
27-45	Crescimento notável em volume e área.
57-134	Pico de desenvolvimento estrutural poroso.
498	Volume máximo, porém em volume máximo em menor área relativa.

Fonte: BET (Brunauer–Emmett–Teller)

O volume de poros também aumentou gradualmente, alcançando 0,0375 cm³/g, com destaque para os valores intermediários em 79,85 Å (0,0100 cm³/g) e 134,6 Å (0,0226 cm³/g), que representam zonas de maior desenvolvimento mesoporoso. De acordo com Zdravkov *et al.* (2007), poros nessa faixa são ideais para aplicações em catálise heterogênea, adsorção de poluentes e separação de biomoléculas. As distribuições diferenciais (dV(r), dS(r), dV(logr), dS(logr)) indicam que os poros entre 21 e 134 Å são os mais ativos, funcionando como regiões de maior interação com os adsorvatos. Conforme Solcová *et al.* (2006), essas faixas representam os “hot spots” de adsorção, sendo fundamentais para o desempenho do material em processos de troca iônica e filtração seletiva.

A presença de poros maiores e a distribuição contínua de volume e área superficial sugerem que o material possui estrutura porosa ampla e bem distribuída, com predominância de mesoporos e traços de macroporos. Essa configuração é altamente desejável para aplicações em tratamento de águas, clarificação de líquidos, adsorção de compostos orgânicos e processos catalíticos, conforme destacado por Tanko e Tijjani (2018).

Análise dos dados da isoterma de 75 μm :

A isoterma de adsorção analisada apresenta características típicas de materiais mesoporosos, conforme classificação da IUPAC, sendo do tipo IV, com formação de múltiplas camadas (multilayer), capilaridade e presença de histerese. Esse tipo de comportamento é amplamente discutido por Sing *et al.* (1985), que associam a histerese à condensação capilar em poros cilíndricos e à geometria complexa da rede porosa, de acordo com o gráfico da Figura 21.

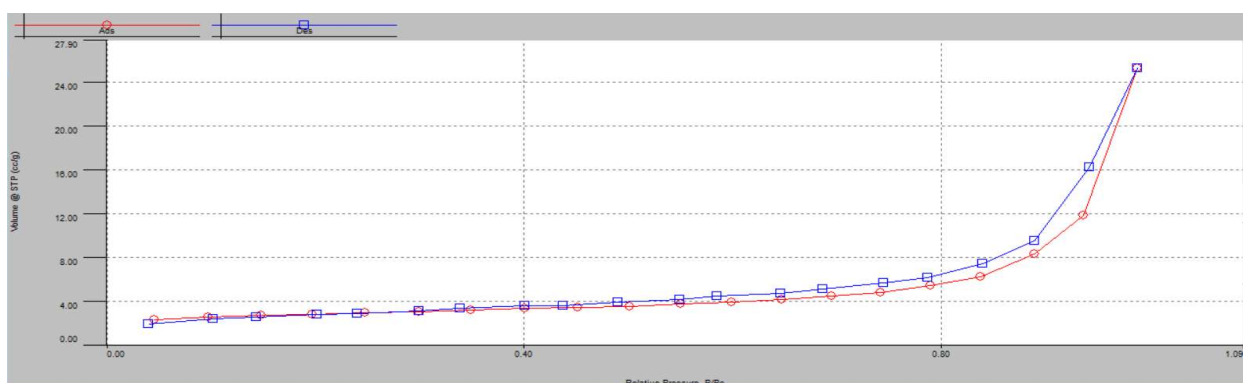


Figura 21- Gráfico da Isoterma #75 μm .
Fonte: Autora (2025).

Na região inicial ($P/P_0 \approx 0.04$ a 0.75), observa-se crescimento gradual do volume adsorvido, indicando preenchimento de microporos e formação de monolayer, seguido por multilayer. Esse padrão é compatível com os modelos de adsorção descritos por Brunauer, Emmett e Teller (BET), que explicam a formação de múltiplas camadas em superfícies sólidas Brunauer *et al.* (1938).

A região de aceleração ($P/P_0 \approx 0.79$ a 0.99) apresenta um aumento abrupto no volume adsorvido, atingindo 25.32 cc/g, o que é característico da condensação capilar em mesoporos e macroporos. Segundo Thommes *et al.* (2015), esse fenômeno ocorre quando a pressão relativa se aproxima da saturação, promovendo o preenchimento completo dos poros por meio de forças de van der Waals e efeitos de tensão superficial.

A histerese observada no ciclo de dessorção indica que o processo de desocupação dos poros não ocorre de forma reversível, sugerindo a presença de gargalos ou poros com geometria complexa. Esse comportamento é típico de materiais como SBA-15 e MCM-41, conforme descrito por Zdravkov *et al.* (2007), que destacam a influência da conectividade e da morfologia dos poros na retenção de moléculas adsorvidas.

Portanto, os dados experimentais indicam que o material possui:

- Alta capacidade de adsorção, especialmente em pressões elevadas;
- Estrutura porosa bem desenvolvida, com predominância de mesoporos;
- Presença de histerese, associada à geometria dos poros e à capilaridade.

Essas características tornam o material promissor para aplicações em filtragem, catálise heterogênea, adsorção de poluentes e separação de moléculas, conforme apontado por Calzaferri *et al.* (2022) e Mikšík *et al.* (2020).

Análise dos dados de adsorção de 150 μm :

A análise técnica dos dados indica que o material em questão apresenta um comportamento típico de estruturas mesoporosas, com predominância de poros com raio próximo a 130 Å. Essa faixa de distribuição é relevante, pois os mesoporos — definidos pela IUPAC como poros com diâmetro entre 2 e 50 nm — têm alta capacidade de adsorção de moléculas de tamanho médio e grande. A presença de poros acima de 100 Å reforça a tendência de transição para macroporos, favorecendo ainda mais a retenção de compostos orgânicos volumosos, como pigmentos, biomoléculas e contaminantes industriais.

A área superficial específica observada, em torno de 5,87 m²/g, é relativamente baixa quando comparada a adsorventes como carvão ativado ou sílica gel, que podem ultrapassar 800 m²/g. No entanto, esse valor não compromete a funcionalidade do material, já que os poros maiores proporcionam maior acessibilidade às moléculas adsorvidas, o que é vantajoso em sistemas com fluxo contínuo ou em aplicações que exigem rápida difusão.

Já o volume total de poros, de aproximadamente 0,057 cm³/g, é considerado intermediário. Esse resultado indica que o material possui boa capacidade de retenção de líquidos ou gases, embora não se destaque como um adsorvente altamente poroso. Essa configuração favorece aplicações em que a adsorção de moléculas maiores seja essencial, como no pré-tratamento de

águas, na remoção de contaminantes orgânicos ou como suporte para catalisadores em reações heterogêneas.

Em síntese, o perfil poroso do material revela potencial para aplicações práticas em processos físico-químicos, com desempenho satisfatório nas funções de filtração, adsorção e suporte catalítico. Sua estrutura mesoporosa com traços de macroporos o torna um candidato promissor para tecnologias ambientais e industriais voltadas à purificação de líquidos e gases.

Análise dos dados de dissociação de 150 μm :

A análise da isoterma de adsorção revela que o material possui estrutura predominantemente mesoporosa, com distribuição de poros entre aproximadamente 17 Å e 445 Å, e pico pronunciado em 139,63 Å, onde o volume de poros atinge 0,0380 cm³/g. Essa faixa de raio de poros está de acordo com a classificação da IUPAC para mesoporos (2–50 nm ou 20–500 Å), sendo compatível com materiais como SBA-15 e MCM-41, amplamente utilizados em catálise e adsorção (Sing *et al.*, 1985; Thommes *et al.*, 2015).

A área superficial específica de 8,43 m²/g é considerada moderada, especialmente quando comparada a materiais microporosos como carvão ativado ou sílica gel, que podem ultrapassar 800 m²/g de acordo com Zdravkov *et al.* (2007). No entanto, essa área é suficiente para aplicações em que a acessibilidade dos poros e o transporte de moléculas maiores são mais relevantes do que a superfície interna total, como em processos de filtração de compostos orgânicos ou suporte catalítico leve de acordo com Calzaferri *et al.* (2022).

O volume total de poros de 0,059 cm³/g indica boa capacidade de retenção, embora não seja elevado em comparação com materiais altamente porosos. Essa característica favorece a adsorção de moléculas maiores e líquidos em sistemas de fluxo contínuo, conforme discutido por Miksík *et al.* (2020), que destacam a importância da distribuição de poros para o desempenho em aplicações ambientais e industriais.

A isoterma de adsorção apresenta comportamento típico de materiais mesoporosos, classificada como tipo IV segundo a IUPAC. Na fase inicial (P/P₀: 0,04–0,75), observa-se crescimento gradual do volume adsorvido, de ~1,54 até ~5,62 cm³/g, indicando formação de monocamada e início de multicamadas. Esse padrão é compatível com o modelo BET para adsorção física em superfícies sólidas, de acordo com Brunauer *et al.* (1938).

Na região de capilaridade (P/P_0 : 0,75–0,99), há aumento abrupto do volume adsorvido, atingindo 38,01 cm³/g, evidenciando condensação capilar em meso/macroporos. Esse fenômeno é amplamente descrito por Buttersack (2019) e Thommes *et al.* (2015), que associam esse comportamento à presença de poros cilíndricos e à formação de multicamadas com posterior preenchimento por capilaridade.

A presença de histerese no ciclo de dessorção, com caminho distinto da adsorção após o ponto máximo ($P/P_0 \approx 0,986$), reforça a classificação como isoterma tipo IV com histerese. Esse comportamento é típico de materiais com poros de geometria complexa, como canais tortuosos ou poros em forma de garrafa, conforme descrito por Sing *et al.* (1985). Portanto, o material analisado apresenta estrutura porosa adequada para aplicações em adsorção de contaminantes orgânicos, suporte catalítico e encapsulamento de moléculas maiores. Sua combinação de mesoporos e macroporos, aliada à acessibilidade interna e à presença de histerese, o torna promissor para processos que exigem alta difusividade e retenção seletiva.

Análise dos dados da isoterma de 150 µm:

De acordo com Gráfico 22 histerese após $P/P_0 \approx 0,986$: o caminho de desorção difere da adsorção, sugerindo poros com geometria complexa e presença de tortuosidade ou gargalos. A presença de histerese reforça a ideia de que o material possui poros acessíveis mas complexos, ideais para moléculas grandes que requerem difusão seletiva. O perfil da isoterma e a distribuição de poros são compatíveis com materiais como SBA-15 e MCM-41, usados em catálise, adsorção ambiental e encapsulamento molecular. De acordo com gráfico da Figura 21:

Formato da Isoterma: Tipo IV

Região inicial (P/P_0 : 0,04–0,75): crescimento gradual do volume adsorvido (~1,54 até ~5,62 cm³/g), indicando formação de monocamada e início de multicamadas. Compatível com o modelo BET.

Região de capilaridade (P/P_0 : 0,75–0,99): aumento abrupto do volume adsorvido (~38,01 cm³/g), relacionado à condensação capilar em poros cilíndricos ou garrafa.

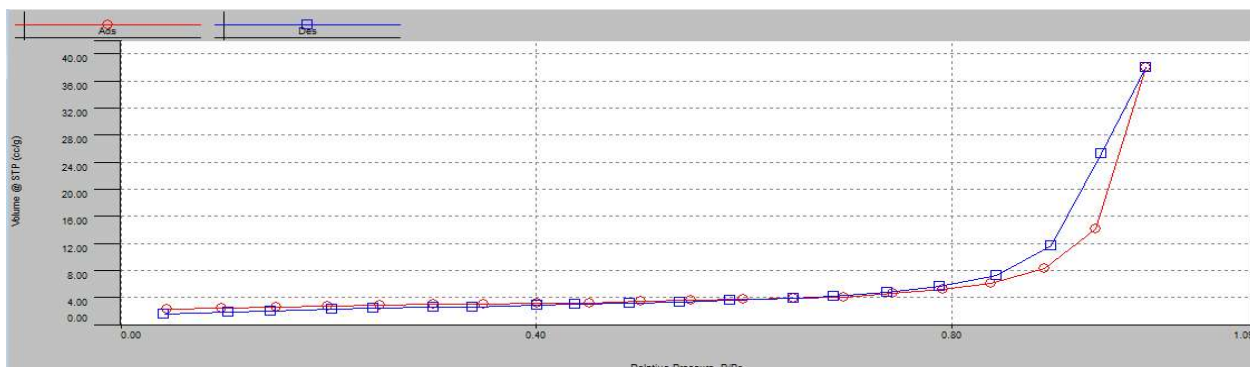


Figura 22- Gráfico da Isoterma #150 µm.
Fonte: Autora (2025).

A alta difusividade e retenção seletiva tornam esse material relevante para:

- Filtração de contaminantes orgânicos;
- Suporte catalítico leve;
- Encapsulamento de moléculas bioativas.

Análise dos dados de adsorção de 250 µm:

A distribuição de poros observada entre 16 e 46 Å indica predominância de microporos e início de mesoporos, conforme classificação da IUPAC, que define microporos como aqueles com diâmetro inferior a 2 nm (20 Å) e mesoporos entre 2 e 50 nm (20–500 Å), de acordo com Zdravkov *et al.* (2007). O pico em 45,87 Å, com volume de poros de 0,0031 cm³/g, sugere maior acessibilidade nessa faixa, favorecendo a adsorção de moléculas pequenas a médias.

O crescimento progressivo do volume de poros até 408,99 Å, acompanhado de redução na área superficial incremental, é típico de poros maiores, que contribuem mais para o volume total do que para a área superficial efetiva, de acordo com Thommes *et al.* (2015). Esse comportamento é compatível com materiais que apresentam transição gradual entre mesoporos e macroporos, embora o volume total ainda seja modesto.

As distribuições diferenciais dV(logr) e dS(logr) reforçam a presença de poros ativos concentrados entre 16 e 45 Å, o que, segundo Sing *et al.* (1985), representa regiões de maior interação com adsorvatos, especialmente em processos de adsorção física. Essa faixa é considerada ideal para aplicações que exigem seletividade e eficiência na captura de contaminantes orgânicos leves ou moléculas de pequeno porte.

A área superficial total de aproximadamente 5,87 m²/g é considerada moderada quando

comparada a materiais altamente microporosos, como carvão ativado ou sílica gel, que podem ultrapassar 800 m²/g, de acordo com Zdravkov *et al.* (2007). No entanto, essa área é suficiente para aplicações em que a acessibilidade dos poros e a difusão molecular são mais relevantes do que a superfície interna total, como em encapsulamento de moléculas, pré-tratamento de líquidos e gases, ou como suporte catalítico leve, de acordo com Calzaferri *et al.* (2022).

Portanto, o perfil BJH obtido sugere que o material possui estrutura porosa equilibrada, com boa distribuição de microporos e mesoporos iniciais, o que o torna adequado para aplicações ambientais e industriais que exigem retenção seletiva, difusão eficiente e interação superficial moderada.

Análise dos dados de dissociação de 250 µm:

A curva de desorção revela um perfil típico de materiais mesoporosos, com distribuição de poros centrada em torno de 135 Å, o que corresponde a aproximadamente 13,5 nm. Segundo a classificação da IUPAC, mesoporos são definidos como poros com diâmetro entre 2 e 50 nm (20–500 Å), sendo amplamente utilizados em aplicações que exigem difusão eficiente e retenção seletiva (Sing *et al.*, 1985; Thommes *et al.*, 2015).

A presença de valores crescentes entre 16 e 45 Å indica boa acessibilidade inicial aos poros menores, favorecendo a adsorção de moléculas pequenas e médias. Essa faixa é considerada ideal para processos de encapsulamento molecular, adsorção de contaminantes orgânicos e pré-tratamento de líquidos e gases, conforme discutido por Zdravkov *et al.* (2007) e Calzaferri *et al.* (2022).

A área superficial específica de 8,13 m²/g, embora moderada em comparação com materiais microporosos como carvão ativado (que podem ultrapassar 800 m²/g), é suficiente para aplicações em que a acessibilidade dos poros e a interação com a superfície interna são mais relevantes do que a área total, de acordo com Miksík *et al.* (2020). Já o volume de poros de 0,048 cm³/g indica capacidade de retenção razoável, sem saturação rápida, o que é desejável em sistemas de fluxo contínuo ou em processos catalíticos leves, de acordo com Buttersack (2019).

A presença de histerese na curva de desorção — evidenciada pelo caminho distinto em relação à adsorção — sugere que os poros possuem geometria complexa, como canais estreitos, poros em forma de garrafa ou ramificações. Esse comportamento é típico de isotermas tipo IV,

conforme classificação da IUPAC, e está associado à condensação capilar e à retenção prolongada de moléculas (Sing *et al.*, 1985; Toncón-Leal *et al.*, 2021).

Análise da isoterma de 250 μm :

A isoterma de adsorção obtida para a amostra apresenta comportamento típico de materiais mesoporosos, sendo classificada como Tipo IV segundo a nomenclatura da IUPAC, caracterizada pela formação de multicamadas, presença de condensação capilar e ciclo de histerese (Sing *et al.*, 1985; Thommes *et al.*, 2015). A curva mostra crescimento gradual do volume adsorvido na faixa de P/P_0 de 0,04 a 0,75, indicando formação de monocamada e início da multicamada, com forte interação entre o gás e as superfícies internas do sólido — evidência da presença de microporos e superfícies energéticas, de acordo com Brunauer *et al.* (1938), de acordo com o gráfico da Figura 23.

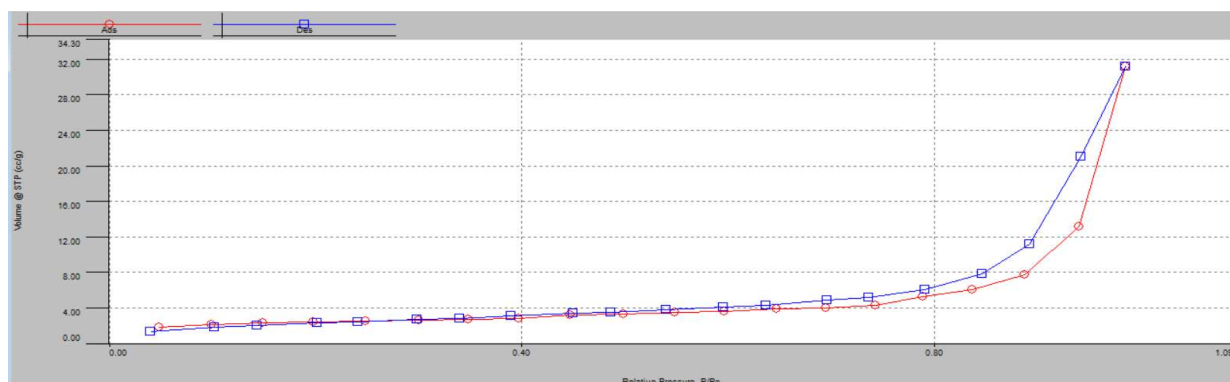


Figura 23- Gráfico da Isoterma #250 μm .

Fonte: Autora (2025).

Na região intermediária (P/P_0 de 0,75 a 0,88), observa-se um aumento mais acentuado do volume adsorvido, chegando a $\sim 7,71 \text{ cm}^3/\text{g}$, o que sugere preenchimento de mesoporos e início da condensação capilar. Já na região de capilaridade ($P/P_0 > 0,88$), há um salto expressivo no volume adsorvido, atingindo $31,18 \text{ cm}^3/\text{g}$ em $P/P_0 = 0,9849$, indicando a presença de meso/macroporos com formação de líquido nos poros maiores. A desorção ocorre por caminho distinto, configurando histerese, característica de estruturas porosas complexas com gargalos ou canais ramificados, de acordo com Toncón-Leal *et al.* (2021).

A análise da distribuição de poros revela quatro faixas estruturais distintas:

- 17–27 Å: microporos iniciais com baixa contribuição volumétrica;
- 32–58 Å: zona de mesoporos com crescimento progressivo;

- 78–129 Å: faixa de máxima atividade porosa, com maior concentração de poros ativos;
- 129–422 Å: transição para macroporos, que contribuem mais para o volume total do que para a área superficial.

O volume total de poros atinge $\sim 0,0579 \text{ cm}^3/\text{g}$, com pico em 422 Å, enquanto a área superficial é de $6,383 \text{ m}^2/\text{g}$, valor considerado moderado para materiais mesoporosos. Segundo Zdravkov *et al.* (2007), essa configuração é ideal para adsorção de moléculas médias, com boa acessibilidade e difusão interna. Os dados de $dV(\log r)$ e $dS(\log r)$ indicam forte distribuição de poros entre 24 e 130 Å, com destaque para a faixa de 24–46 Å, sugerindo canais bem conectados e estrutura porosa interligada, de acordo com Calzaferri *et al.* (2022).

A presença de poros maiores ($>400 \text{ Å}$) contribui significativamente para o volume, mas pouco para a área superficial, sendo útil para retenção de líquidos ou moléculas grandes, embora menos eficaz em processos que dependem de reações superficiais, de acordo com Buttersack (2019).

Análise dos dados de adsorção de 425 μm :

A análise da amostra por meio do método BJH de adsorção de nitrogênio a 77,35 K revelou uma estrutura mesoporosa, com distribuição de poros centrada em torno de 129,11 Å (12,9 nm). Essa faixa se enquadra na classificação da IUPAC, que define mesoporos como poros com diâmetro entre 2 e 50 nm (SING *et al.*, 1985). Com a área superficial total: $6,383 \text{ m}^2/\text{g}$. Apesar de inferior a materiais altamente microporosos, como carvão ativado ou sílica gel ($>800 \text{ m}^2/\text{g}$), essa área é suficiente para aplicações que priorizam acessibilidade e difusão molecular, de acordo com Zdravkov *et al.*, 2007.

Sobre o volume total de poros: $0,058 \text{ cm}^3/\text{g}$ esse volume é considerado moderado e adequado para processos de fluxo contínuo, pré-tratamento de gases e líquidos ou como suporte catalítico leve (Calzaferri *et al.*, 2022; Buttersack, 2019).

Sobre a distribuição dos poros: A presença de microporos entre 17 Å e 45 Å favorece a adsorção de moléculas pequenas, enquanto os mesoporos maiores (129 Å a 422 Å) contribuem principalmente para o volume total, caracterizando uma transição gradual entre meso e macroporos (Thommes *et al.*, 2015).

A combinação de poros acessíveis e área superficial moderada torna esse material promissor para:

- Adsorção de contaminantes orgânicos leves;
- Encapsulamento molecular;
- Suportes catalíticos de baixa carga ativa;
- Sistemas de purificação em fluxo contínuo.

A distribuição concentrada entre microporos e mesoporos iniciais proporciona seletividade e eficiência em processos físicos de adsorção, conforme discutido por Miksík *et al.* (2020) e Zdravkov *et al.* (2007).

Análise dos dados de dissociação de 425 μm :

A isoterma de adsorção obtida para a amostra apresenta comportamento típico de materiais mesoporosos, sendo classificada como Tipo IV segundo a nomenclatura da IUPAC, caracterizada pela formação de multicamadas, presença de condensação capilar e ciclo de histerese (Sing *et al.*, 1985; Thommes *et al.*, 2015). A curva mostra crescimento gradual do volume adsorvido na faixa de P/P_0 de 0,04 a 0,75, indicando formação de monocamada e início da multicamada, com forte interação entre o gás e as superfícies internas do sólido — evidência da presença de microporos e superfícies energéticas, de acordo com Brunauer *et al.* (1938).

Na região intermediária (P/P_0 de 0,75 a 0,88), observa-se um aumento mais acentuado do volume adsorvido, chegando a $\sim 7,71 \text{ cm}^3/\text{g}$, o que sugere preenchimento de mesoporos e início da condensação capilar. Já na região de capilaridade ($P/P_0 > 0,88$), há um salto expressivo no volume adsorvido, atingindo $31,18 \text{ cm}^3/\text{g}$ em $P/P_0 = 0,9849$, indicando a presença de meso/macroporos com formação de líquido nos poros maiores. A desorção ocorre por caminho distinto, configurando histerese, característica de estruturas porosas complexas com gargalos ou canais ramificados, de acordo com Toncón-Leal *et al.* (2021).

A análise da distribuição de poros revela quatro faixas estruturais distintas:

- 17–27 Å: microporos iniciais com baixa contribuição volumétrica.
- 32–58 Å: zona de mesoporos com crescimento progressivo.
- 78–129 Å: faixa de máxima atividade porosa, com maior concentração de poros ativos.
- 129–422 Å: transição para macroporos, que contribuem mais para o volume total do que para a área superficial.

O volume total de poros atinge $\sim 0,0579 \text{ cm}^3/\text{g}$, com pico em $422 \text{ \AA}$, enquanto a área superficial é de $6,383 \text{ m}^2/\text{g}$, valor considerado moderado para materiais mesoporosos. Segundo Zdravkov *et al.* (2007), essa configuração é ideal para adsorção de moléculas médias, com boa acessibilidade e difusão interna. Os dados de $dV(\log r)$ e $dS(\log r)$ indicam forte distribuição de poros entre 24 e $130 \text{ \AA}$, com destaque para a faixa de $24\text{--}46 \text{ \AA}$, sugerindo canais bem conectados e estrutura porosa interligada (Calzaferri *et al.*, 2022).

A presença de poros maiores ($>400 \text{ \AA}$) contribui significativamente para o volume, mas pouco para a área superficial, sendo útil para retenção de líquidos ou moléculas grandes, embora menos eficaz em processos que dependem de reações superficiais (Buttersack, 2019).

Análise dos dados de isoterma de $425 \text{ \mu m}$:

A sua curva apresenta um perfil típico de isoterma tipo IV, segundo a classificação da IUPAC, com histerese bem definida e crescimento por etapas. Isso indica a presença de mesoporos, com possível transição entre microporos e macroporos. Esse comportamento é compatível com materiais como sílica mesoporosa, argilas modificadas e certos carvões ativados, que também apresentam histerese e elevada capacidade de adsorção.

De acordo com a revisão de Milhomem (UFT, 2018), isotermas com histerese estão associadas a adsorção física em poros com geometria complexa, como os encontrados em materiais com estrutura desordenada ou com gargantas estreitas. Além disso, o modelo BET é frequentemente utilizado para ajustar esse tipo de curva, especialmente na região de pressões relativas intermediárias, onde há formação de multicamadas.

Comparando com dados da literatura:

- Langmuir: assume superfície homogênea e sem histerese — não se aplica bem ao seu caso.
- Freundlich: útil para superfícies heterogêneas, mas não modela bem a região de histerese.
- BET: adequado para multicamadas e pode ser ajustado à sua curva até o ponto de inflexão antes da histerese.

De acordo com o gráfico da Figura 24:

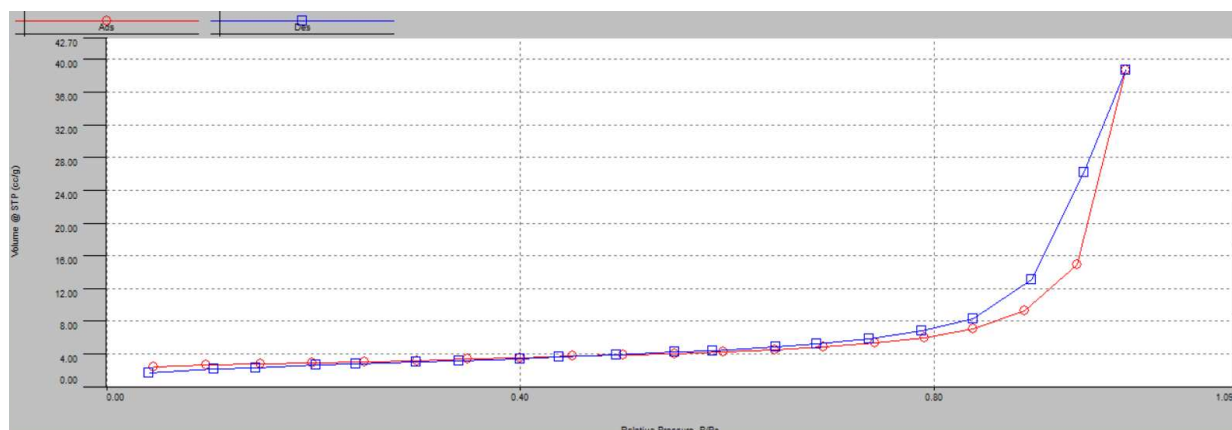


Figura 24- Gráfico da Isoterma #425 µm.
Fonte: Autora (2025).

Com base na análise da curva de adsorção, o comportamento observado pode ser classificado como uma isoterma do tipo IV, segundo a classificação proposta pela IUPAC. Esse tipo de isoterma é característico de materiais mesoporosos, com poros de diâmetro entre 2 e 50 nm, e apresenta adsorção em multicamadas seguida de condensação capilar, geralmente acompanhada por histerese no ciclo de desorção, de acordo com Thommes *et al.* (2015) e Milhomem (2020).

Na fase inicial ($P/P_0 \approx 0,04$ a $0,75$), observa-se um crescimento gradual do volume adsorvido, de 1,68 até aproximadamente 5,93 cc/g, comportamento típico da formação de monocamadas e início das multicamadas, indicando a presença de microporos e superfícies internas com alta energia de adsorção.

Na fase intermediária ($P/P_0 \approx 0,75$ a $0,88$), a adsorção acelera, atingindo cerca de 9,22 cc/g, o que é atribuído à condensação capilar dentro dos mesoporos. Essa etapa marca o início da histerese, evidenciada pela diferença entre os ciclos de adsorção e desorção.

Por fim, na fase final ($P/P_0 > 0,88$), há um crescimento abrupto do volume adsorvido, chegando a 38,74 cc/g em $P/P_0 = 0,9857$. Esse comportamento indica o preenchimento de poros maiores, típicos de meso/macroporos, seguido por uma queda nos valores durante a desorção, reforçando a presença de gargalos ou canais tortuosos que dificultam a saída do adsorbato.

Com base nos dados obtidos por meio do teste BET (Brunauer–Emmett–Teller), observa-se uma variação significativa nas propriedades texturais das amostras de diferentes granulometrias. A amostra com granulometria de 425 µm apresentou os melhores resultados em termos de área superficial específica (BET), área de poros (BJH), volume de poros e raio médio dos poros. Especificamente, essa amostra registrou a maior área BET (5,007 m²/g), indicando uma

superfície mais ampla disponível para adsorção de impurezas presentes no fermentado alcoólico. Além disso, o volume de poros ($0,058 \text{ cm}^3/\text{g}$) foi o mais elevado entre as amostras, sugerindo maior capacidade de retenção de partículas. O raio médio dos poros ($129,117 \text{ \AA}$) também se destacou, sendo ideal para a captura de flocos maiores formados durante o processo de clarificação com *Moringa oleifera* Lam. Esses parâmetros são fundamentais para a eficiência do processo de clarificação, pois influenciam diretamente a interação entre o adsorvente e os contaminantes. Assim, conclui-se que a amostra de $425 \text{ }\mu\text{m}$ apresenta as melhores características físico-químicas para aplicação como agente clarificante, oferecendo maior potencial de remoção de impurezas e turbidez do meio.

6 CONCLUSÕES FINAIS

A clarificação positiva do fermentado é um processo que busca melhorar a sua qualidade por meio da remoção de impurezas, especialmente partículas em suspensão e contaminantes.

O uso conjunto da moringa e do resíduo cerâmico criaram um sistema sinérgico de clarificação: primeiro, ocorre a formação dos flocos com a moringa; depois, a filtração em paralelo à adsorção com a telha cerâmica complementa o tratamento, resultando em água mais limpa e segura. O presente estudo contribuiu também no desenvolvimento de pesquisas para as ODS 11,12, 13 e 15.

Assim, tanto a *Moringa oleifera* Lam. quanto o uso de resíduos de telhas proporcionaram clarificação do fermentado de caldo de cana, melhor desempenho: os tratamentos com RC #425 µm e RC #250 µm apresentaram as maiores reduções, sugerindo que granulometrias maiores favorecem a remoção de impurezas, efeito da granulometria: à medida que as partículas do RC ficam menores, há tendência de redução na eficácia do tratamento, em ambas amostragens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABES. Ensaio de tratabilidade em leitos de drenagem de resíduos gerados em ETA's. 2025. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anais eletronicos/33cbesa/1047_tema_i.pdf. Acesso em: 10 jul. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7181:2025 – Solo: Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2025. Disponível em: <https://abnt.org.br>. Acesso em: 15 jul. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15310: Componentes cerâmicos – Telhas – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. Disponível em: <https://abnt.org.br>. Acesso em: 15 jul. 2025.

ABNT. NBR 16271:2019 – Cana-de-açúcar para produção de etanol – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

ABNT. NBR 16498: Materiais têxteis — Determinação de metais pesados por digestão ácida assistida por micro-ondas. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018. Disponível em: [Normas.com.br](https://normas.com.br). Acesso em: 31 jul. 2025.

ABNT. NBR ISO/IEC 17925:2017 – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

ABNT. NBR ISO/IEC 17043:2024 – Avaliação da conformidade – Ensaio de proficiência. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024.

ABNT. NBR 5992:2008 – Álcool etílico e suas misturas com água – Determinação da massa específica e do teor alcoólico – Método do densímetro de vidro. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

ABNT. NBR 9898:2021 – Preservação e técnicas de amostragem de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.

ABNT. NBR ISO/IEC 17025: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017. Disponível em: [ABNT NBR ISO/IEC 17025](https://abnt.org.br). Acesso em: 31 jul. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023:2018 – Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15310:2009 – Componentes cerâmicos – Telhas – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA). Lixo: Brasil gerou mais de 40 mil toneladas de resíduos de construção. 2024. Disponível em: <<https://www.abrema.org.br/2024/06/18/lixo-brasil-gerou-mais-de-40-mil-toneladas-de-residuos-de-construcao/>>. Acesso em: 18 maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6502:1995 – Rochas e solos: Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. Disponível em: https://www.academia.edu/16888754/ABNT_NBR_6502_1995. Acesso em: 15 jul. 2025.

ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024. São Paulo: ABREMA, 2024. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/2024/12/10/relatorio-aponta-crescimento-da-reciclagem-de-residuos-no-brasil-mas-persistencia-de-lixoes-preocupa>. . Acesso em: 28 jul. 2025.

AFINKO. O que é o Ensaio de Área Superficial (BET)?. Afinko Polímeros, 2021. Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/o-que-e-o-ensaio-de-area-superficial-bet>. Acesso em: 18 jul. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA – ANVISA. RDC nº 31, de 11 de agosto de 2010. Dispõe sobre os estudos de equivalência farmacêutica e perfil de dissolução comparativo. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 12 ago. 2010. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2010/res0031_11_08_2010.html. Acesso em: 14 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA – ANVISA. *Farmacopeia Brasileira: Volume 1*. 6. ed. Brasília, DF: Anvisa, 2019. Disponível em: <https://bibliotecadigital.anvisa.ibict.br/jspui/handle/anvisa/140>. Acesso em: 14 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA – ANVISA. Resolução DC/ANVISA nº 779, de 1º de março de 2023. Dispõe sobre aditivos alimentares, fermentos e coadjuvantes de tecnologia para produtos de panificação. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-779-2023_443024.html. . Acesso em: 15 maio 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA – ANVISA. Relatório do Monitoramento do Teor de Sódio em Alimentos Industrializados dos anos de 2020 e 2021. Brasília: ANVISA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/centraisdeconteudo/publicacoes/monitoramento/programas->

nacionais-de-monitoramento-de-alimentos/

RELATRIODOMONITORAMENTODOTEORDESIOEMALIMENTOSINDUSTRIALIZADOS2020e2021.pdf/view. Acesso em: 31 jul. 2025.

ANVISA. Critérios, indicadores e parâmetros. Brasília: Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/snvs/projetos/praticas-avaliativas/apresentacoes/a06-congeas_2020_criterios-indicadores-parametros.pdf. Acesso em: 10 jul. 2025.

ANVISA. Importância do álcool no controle de infecções em serviços de saúde. Brasília: Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2010. Disponível em: http://antigo.anvisa.gov.br/documents/33852/271385/controle_alcool.pdf. Acesso em: 10 jul. 2025.

ALMAWATECH. Poliacrilamida: aplicações e propriedades. 2024. Disponível em: <https://www.almawatech.com/pt/aguas-residuais/poliacilamida>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ALS. EnviroMail Brasil Nº 39 – Metais no Meio Ambiente. ALS Ambiental Brasil, junho 2024. Disponível em: EnviroMail ALS. Acesso em: 18 jul. 2025.

ALVES, E. R. et al. Viabilidade do uso de resíduos da cerâmica vermelha em materiais da construção civil: uma revisão de literatura. Risco: Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo, v. 23, n. 1, p. e219819, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/1984-4506.risco.2025.219819>. Acesso em: 15 jul. 2025.

ALVES, M. F. Moringa oleifera e sulfato de alumínio aplicados como coagulantes ao esgoto sanitário – análise do efluente tratado e do lodo residual. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/33778/1/moringasulfatoesgotosanitario.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.

AMARAL, F. S. Influência conjunta do pH, temperaturas e concentrações de sulfito na fermentação alcoólica de mosto de sacarose. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2022.

ANASTÁCIO, A. S. S.; CAMPOS, A. R. N. Bioconversão da moringa por fermentação semissólida. UFCG, 2024. Disponível em: <https://revistas.editora.ufcg.edu.br/index.php/cicufcg/article/view/4179>

ANCAT – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS CATADORES E CATADORAS DE MATERIAIS RECICLÁVEIS. Atlas Brasileiro da Reciclagem. 2. ed. Brasília: ANCAT, 2023. Disponível em: <https://atlasbrasileirodareciclagem.ancat.org.br>. Acesso em: 28 jul. 2025.

ANDRADE, N. D.; SILVA, D. M. Análise dos métodos Brix e cromatografia para determinação de açúcares redutores residuais totais. Universidade de Rio Verde, 2016. Disponível em: <https://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/AN%C3%81LISE%20DOS%20M%C3%89TODOS%20BRIX%20E%20CROMATOGRÁFIA%20PARA%20A%20DETERMINA%C3%87%C3%83O%20DE%20A%C3%87%C3%9ACARES%20REDUTORES%20RESIDUAIS%20TOTAIS.pdf> Acesso em: 31 jul. 2025.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed., Washington, D.C., 2017.

APHA; AWWA; WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2017.

APPC – Associação dos Produtores de Cana-de-Açúcar. Manual técnico da qualidade da cana-de-açúcar. São Paulo: APPC, 2024.

ARCHDAILY. MARTINO, G. Transformando argila em estrutura: como a cerâmica é usada na construção civil. 2022. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/982726/transformando-argila-em-estrutura-como-a-ceramica-e-usada-na-construcao-civil>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ASTM. ASTM D3663-20 – Standard Test Method for Surface Area of Catalysts and Catalyst Carriers. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

BARBOSA, A. S. et al. Uso da Moringa oleifera Lam. como coagulante alternativo no tratamento de água destinada ao consumo humano. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – CONGESTAS, 2019. Anais [...]. João Pessoa: Ecogestão Brasil, 2019. Disponível em: <http://eventos.ecogestaobrasil.net/congestas2019/trabalhos/pdf/congestas2019-et-02-018.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.

BERNARDI, G. A.; COSTA, T. C. M. Avaliação da atividade antimicrobiana do álcool 70% em superfícies contaminadas. Curitiba: Centro Universitário Autônomo do Brasil, 2017. Disponível em: <https://crm-v-pr.org.br/uploads/noticia/arquivos/Avaliacao-da-atividade-antimicrobiana-do-alcool-70-em-superficies-contaminadas.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.

BERWIG, K. P. et al. Influência do tipo de farinha, da temperatura e do tempo de fermentação na qualidade de pães de forma. *Brazilian Journal of Food Research*, v. 9, n. 4, p. 27–46, 2018.

Disponível em: Revistas UTFPR. Acesso em: 31 jul. 2025.

BEZERRA, I. M. T. Desenvolvimento de corpos cerâmicos utilizando ativação alcalina no resíduo da cerâmica vermelha. 2014. 109 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/jspui/handle/riufcg/7192>. Acesso em: 15 jul. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul. 2002. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=19132. . Acesso em: 08 junho 2025.

BRASIL. Decreto nº 12.082, de 27 de junho de 2024. Institui a Estratégia Nacional de Economia Circular. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/decreto/D12082.htm. Acesso em: 10 jul. 2025.

BRASIL. Decreto nº 6.871, de 4 de junho de 2009. Dispõe sobre a padronização dos procedimentos de registro e autorização de funcionamento de empresas. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 4 jun. 2009. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=6871&ano=2009&ato=756AzZq1U>. . Acesso em: 25 abr. 2025.

BRASIL. Lei nº 8.918, de 14 de julho de 1994. Dispõe sobre a padronização, classificação, registro, inspeção, produção e fiscalização de bebidas, autoriza a criação da Comissão Intersetorial de Bebidas e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L8918.htm. . Acesso em: 21 maio 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/GM/MS, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 24 maio 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_24_05_2021_rep.html. . Acesso em: 15 maio 2025.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 453/2024 – EM: Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos e agregados – Especificação de material. Brasília: DNIT, 2024. Disponível em:

https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dnit_453_2024_em.pdf. Acesso em: 21 jul. 2025.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 459/2025 – ME: Solos – Análise granulométrica – Método de ensaio. Brasília: DNIT, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_459_2025_me.pdf. Acesso em: 21 jul. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: Planalto - Lei nº 12.305/2010. Acesso em: 29 jul. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Resolução nº 91, de 14 de março de 2024: atualiza procedimentos para coleta e preservação de amostras ambientais. Brasília, DF: ANA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-publica-resolucao-que-atualiza-procedimentos-para-coleta-e-preservacao-de-amostras-ambientais-na-operacao-da-rqna>. Acesso em: 31 jul. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Guia nº 19/2019: coleta e transporte de amostras para análise laboratorial. Versão atualizada em 2022. Brasília, DF: ANVISA, 2022. Disponível em: <https://bing.com/search?q=decanta%3a7%3a3o+para+coleta+de+amostras+%3baltimos+5+anos>. Acesso em: 31 jul. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Política Nacional do Açúcar e do Alcool. Brasília: MAPA, 2023.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, v. 60, n. 2, p. 309–319, 1938.

BUTTERSACK, C. Modeling of type IV and V sigmoidal adsorption isotherms. *Physical Chemistry Chemical Physics*, v. 21, p. 5614–5626, 2019.

CALZAFERRI, G. et al. Multiple equilibria describe the complete adsorption isotherms of nonporous, microporous, and mesoporous adsorbents. *Microporous and Mesoporous Materials*, v. 330, p. 111563, 2022.

CÂMARA, C. N.; GUIMARÃES, C. C. Fermentação alcoólica: estudo de caso sobre ações para

otimização do processo. FATEC Jaboticabal, 2024. Disponível em: <https://publicacoes.fatecjaboticabal.edu.br/citec/article/view/333>

CANCELIER, A. et al. Influência de parâmetros de processo na obtenção de bebida fermento-destillada de *Hovenia dulcis*. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 16, n. 1, 2020. Disponível em: SciELO Brasil. Acesso em: 31 jul. 2025.

CAPUTO, Homero Pinto. *Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CAPUTO, H. P. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. v. 1. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2014.

CASTRO DE ALMEIDA, V. et al. Avaliação da influência da granulometria no reaproveitamento de resíduos de blocos cerâmicos. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2024. Disponível em: abes-dn.org.br. Acesso em: 31 jul. 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimentos, organismos aquáticos e efluentes líquidos*. São Paulo: CETESB, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/guia-nacional-de-coleta-e-preservacao-de-amostras>. Acesso em: 31 jul. 2025.

CETESB. *Valores orientadores para solos e águas subterrâneas*. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2024.

CHAPECALI. O que são parâmetros de qualidade na metrologia. 2023. Disponível em: <https://chapecali.com.br/glossario/o-que-e-parametros-de-qualidade-na-metrologia>. Acesso em: 10 jul. 2025.

COELHO, T. C. C.; GOMES, C. E. M.; DORNELLES, K. A. Desempenho térmico e absorção solar de telhas de fibrocimento sem amianto submetidas a diferentes processos de envelhecimento natural. *Ambiente Construído*, v. 17, n. 1, p. 147-161, 2017. DOI: 10.1590/s1678-86212017000100129.

COMO DESCARTAR TELHAS DE CERÂMICA. 2025. Disponível em: <https://comodescartar.com.br/2370/como-descartar-telhas-de-ceramica/>. Acesso em: 09 maio 2025.

- CONCENTSISTEMAS. Indicadores de desempenho na qualidade laboratorial. 2025. Disponível em: <https://concentsistemas.com.br/2025/04/08/indicadores-de-desempenho-na-qualidade-laboratorial>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- COSTA, G. H. G. Emprego do extrato de Moringa (*Moringa oleifera* Lam.) na clarificação do caldo de cana para produção de açúcar e etanol. UNESP, 2015. Disponível em: <https://acervodigital.unesp.br/handle/11449/132879>
- COSTA, L. M. F. A. Análise físico-química de cervejas tipo pilsen comercializadas em Campina Grande. Campina Grande: Universidade Estadual da Paraíba, 2010. Disponível em: <https://dspace.bc.uepb.edu.br>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- COSTA, M. A.; LIMA, R. F.; SANTOS, J. P. Condutividade elétrica e qualidade de alimentos líquidos. São Paulo: Editora AgroTec, 2020.
- COSTA, M. F. et al. Clarificação e estabilização de fermentados alcoólicos: avanços tecnológicos e aplicações. *Revista Brasileira de Tecnologia de Alimentos*, v. 34, e2020123, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbta/a/ExemploURL>. Acesso em: 22 set. 2025.
- CRC. Área superficial específica – BET. Centro de Revestimentos Cerâmicos, 2025. Disponível em: <https://www.crceram.com.br/area-superficial-especifica-bet>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- DI RENZO, T.; REALE, A. Process optimization and quality improvement of fermented foods and beverages. *Foods*, v. 14, n. 7, p. 1238, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/7/1238>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- DIAS, J. F. Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-16122004-130717/?lang=pt-br>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- DIGITAL WATER. Avanços tecnológicos no tratamento de água e efluentes em 2024. Disponível em: <https://www.digitalwater.com.br/inovacoes-e-solucoes-sustentaveis-no-tratamento-de-agua-e-efluentes-em-2024>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- DIGITAL WATER. Filtração no tratamento de água e efluentes. 2024. Disponível em: <https://www.digitalwater.com.br/handbook-veolia-filtracao-cap-6>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- DNER. DNER-ME 051/94: Solos – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

DOMINGUINI, L.; MENEGARO, D. A.; MIGUEL, T. F.; DAL BÓ, M. Utilização de resíduos de materiais cerâmicos na adsorção de corante azul de metileno. *Cerâmica*, São Paulo, v. 60, n. 354, p. 218–222, abr. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000200009>. Acesso em: 10 jul. 2025.

DORTA, C. et al. Synergism among lactic acid, sulfite, pH and ethanol in alcoholic fermentation of *Saccharomyces cerevisiae* (PE-2 and M-26). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 22, p. 177-182, 2006. DOI: 10.1007/s11274-005-9016-1.

ECYCLE. Argila: o que é, tipos e aplicações. São Paulo: eCycle, 2024. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/argila-o-que-e-tipos-e-aplicacoes/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

EMBRAPA AGROENERGIA. VAZ JÚNIOR, S. Potencial do carbono renovável para a economia circular. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2023. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1158696/1/DOC53-2023-Agroenergia.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.

EMBRAPA. Fermentação. Agência de Informação Tecnológica. Disponível em: Portal Embrapa. Acesso em: 10 jul. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Fermentação do caldo de cana-de-açúcar. 2022. Disponível em: www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar/tratamento-do-caldo/fermentacao#:~:text=Condução%20da%20fermentação,%20Uma%20vez%20preparados%20o%20fermento%20e%20o Acesso em: 26 de setembro de 2024.

2024.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Tecnologias para a produção de etanol: eficiência fermentativa e parâmetros críticos. Brasília: EMBRAPA Agroenergia, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agroenergia>. Acesso em: 15 jul. 2025.

EMBRAPA. Tratamento do caldo de cana-de-açúcar para fermentação alcoólica. Brasília: Embrapa Agricultura Digital, 2025. Disponível em: Portal Embrapa. Acesso em: 31 jul. 2025.

ENGENHARIA CIVIL FSP. Unidade 3 – Granulometria dos Solos. São Paulo: Faculdade São Paulo, 2013.

FALCÃO, D. S.; MOURA, T. L.; SILVA, J. P. Caracterização de argilas da Paraíba para uso em telhas cerâmicas: plasticidade e conformação. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 28, n. 1, p. e12801, jan. 2023. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/materia>>. Acesso em: 30 jul. 2025.

FAST TECNOLOGIA INDUSTRIAL. Flotador por ar dissolvido como tratamento e clarificação do efluente. 2025. Disponível em: <https://www.fastindustria.com.br/cases/flotador-por-ar-dissolvido-como-tratamento-e-clarificacao-do-efluente>. Acesso em: 10 jul. 2025.

FAVERO, C.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, L. C. Clarificação de caldo de cana utilizando adsorventes naturais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 18, n. 2, p. 123–129, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000200009>.

FERMENTEC ACADEMY. Fermentação alcoólica na produção de etanol. 2025. Disponível em: <https://fermentecacademy.com/fermentacao-alcoolica-na-producao-de-etanol/>

FERREIRA, B. C. et al. Avaliação da eficiência da Moringa oleifera como coagulante natural no tratamento de água para consumo humano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 28, n. 1, p. e20240123, 2024. doi: 10.1590/2318-0331.28240123. Acesso em: 15 jul. 2025.

FERREIRA, B. M.; SILVA, M. C. da. Avaliação da moringa como coagulante natural em águas com turbidez elevada. *Revista Ambiente & Água*, Taubaté, v. 18, n. 2, p. 1–12, 2023. doi: 10.4136/ambi-agua.2931. Acesso em: 15 jul. 2025.

FERNANDES, S. M. et al. Fermentação de caldo de cana em microdestilaria. Uberaba: Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Química, 2021. Disponível em: UNIUBE. Acesso em: 31 jul. 2025.

FIGUEIREDO, C. C. M. Aplicação de técnica biotecnológica de fermentação em estado sólido para aproveitamento de resíduos da indústria de farinha de trigo. UNESP, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/75f4db0b-cb14-4fea-a112-55f63f2ff919/content>

FIGUEIREDO, M. T. S. et al. Tratamento de água utilizando extrato de sementes de Moringa oleifera: uma revisão integrativa. Universidade Estadual de Alagoas, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/358320884_Tratamento_de_agua_utilizando_extrato_de_sementes_de_Moringa_oleifera_Uma_revisao_integrativa/fulltext/6380d60d48124c2bc66c3761/Tratamento-de-agua-utilizando-extrato-de-sementes-de-Moringa-oleifera-Uma-revisao-integrativa.pdf. Acesso em: 31 jul. 2025.

FIOCRUZ. Estudo para determinação de metodologia analítica para comprovação da eficácia antimicrobiana do álcool etílico na forma de gel. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Controle de Qualidade em Saúde, 2010. Disponível em: <https://agencia.fiocruz.br/criado-metodo-inedito->

para-analisar-eficacia-antimicrobiana-de-alcool-gel. Acesso em: 10 jul. 2025.

FÍSICO-QUÍMICA EXPERIMENTAL. Ebulliometria. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2025. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/56/o/FQEXP_ebulliometria.pdf. Acesso em: 18 jul. 2025.

FLUENCE. Flotação por Ar Dissolvido (DAF). 2025. Disponível em: <https://www.fluencecorp.com/pt/flotacao-ar-dissolvido>. Acesso em: 10 jul. 2025.

FREIRE, L. V. M. Tratamento de água para comunidades rurais usando Moringa oleifera como coagulante natural. 2017. 130 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/32392/3/2017_dis_lvmfreire.pdf. Acesso em: 10 jul. 2025.

FUSATI. Jar Test – Ensaio de Flocculação. 2025. Disponível em: <https://www.fusati.com.br/jar-test-ensaio-de-floculacao>. Acesso em: 10 jul. 2025.

GADELHA, Abraham Augusto Barbosa. Estimativa de parâmetros geotécnicos de resíduos sólidos urbanos utilizando algoritmos de aprendizado de máquina. 2021. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Geotecnia) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2021.

GEREMEIAS, J. Tendências de metrologia para 2025. Blog da Metrologia, 2025. Disponível em: <https://blogdametrologia.com.br/tendencias-de-metrologia-para-2025>. Acesso em: 10 jul. 2025.

GÓES-FAVONI, S. P.; et al. Fermentação alcoólica: aspectos bioquímicos e microbiológicos. Revista Brasileira de Biotecnologia, v. 22, n. 3, p. 45–52, 2018.

GÓES-FAVONI, S. P.; MONTEIRO, A. C. C.; DORTA, C.; CRIPPA, M. G.; SHIGEMATSU, E. Fermentação alcoólica na produção de etanol e os fatores determinantes do rendimento. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 9, n. 4, p. 285-296, 2018. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.004.0023>

GUIA DA ENGENHARIA. Análise granulométrica do solo. 2020. Disponível em: Guia da Engenharia – Granulometria.

HOPPE FILHO, J. et al. Resíduo de cerâmica vermelha na composição de agregado miúdo de argamassas: efeitos nas propriedades físico-mecânicas. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 25, e140644, jan./dez. 2025. Disponível em: SciELO Brasil. Acesso em: 31 jul. 2025.

HUDSON JUNIOR, H. P. I. Controle de qualidade: análise do Brix para padronização de doces brasileiros. 2022. Projeto Final (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/25739/Projeto%20Final-%20Hudson%20Pedro%20Ivo%20Junior.pdf?sequence=1>. Acesso em: 15 jul. 2025.

INMETRO. DOQ-CGCRE-044: Orientação para elaboração dos escopos de acreditação voltados a laboratórios de ensaio na área de meio ambiente. Brasília: Coordenação Geral de Acreditação, 2022. Disponível em: Documento técnico do Inmetro. Acesso em: 31 jul. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9277:2010 – Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption – BET method. Geneva: ISO, 2010.

IPEA. ODS 12 – Consumo e Produção Sustentáveis. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2024. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods12.html>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ISO. ISO 9277:2010 – Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption using the BET method. Geneva: International Organization for Standardization, 2010.

KIGUEL, J. *et al.* Coagulation and flocculation of turbid water using *Moringa oleifera* seeds. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [S.l.], v. 7, n. 3, p. 102869, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221334371930217X>. Acesso em: 22 set. 2025.

KIM, J. *et al.* Lactic acid bacteria fermentation of barley sprouts: anti-inflammatory potential and microbial dynamics. *Journal of Applied Microbiology*, v. 132, n. 3, p. 456–468, 2025.

KRUEGER, F. *et al.* Variação granulométrica após compactação de misturas de solo com bloco cerâmico. Florianópolis: Instituto Federal de Santa Catarina, 2024. Disponível em: sites.florianopolis.ifsc.edu.br. Acesso em: 31 jul. 2025.

KRUG, F. J. Fundamentos sobre preparo de amostras orgânicas e inorgânicas para análise elementar. 1. ed. São Carlos: IQSC/USP, 2008.

KURITA. Tratamento químico para estação de tratamento de água. 2025. Disponível em: <https://kurita.com.br/artigos-tecnicos/tratamento-quimico-para-estacao-de-tratamento-de-agua>. Acesso em: 10 jul. 2025.

KYRIAKOPOULOS, G.; ARAUJO, L. B.; SANTOS, M. R. Adsorptive behavior of porous ceramics for environmental applications. *Journal of Porous Materials*, v. 31, n. 2, p. 145–160,

2024.

KYRIAKOPOULOS, G. L. et al. Investigating the effect of pore size distribution on the sorption types and the adsorption-deformation characteristics of porous continua: the case of adsorption on carbonaceous materials. *Crystals*, v. 14, n. 8, p. 742, 2024.

LAGETEC – Laboratório de Geotecnia. Análise granulométrica de material granular por peneiramento e sedimentação. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2017. Disponível em: <http://www.lagetc.ufc.br>. Acesso em: 18 jul. 2025.

LEAL, K. 10 alimentos fermentados (e principais benefícios). *Tua Saúde*, jan. 2025. Disponível em: <https://www.tuasaude.com/alimentos-fermentados/>. Acesso em: 15 maio 2025.

LIMA, F. C. S. et al. Processos de fermentação: revisão bibliográfica. In: *Produção de xilitol utilizando licor da pré-hidrólise ácida do bagaço do pedúnculo do caju*. 1Library, 2021. Disponível em: 1Library. Acesso em: 31 jul. 2025.

LIMA, R. R. F. A aplicação de resíduos no desenvolvimento de produtos sustentáveis na indústria cerâmica. *Cerâmica Industrial*, v. 28, n. 1, 2024. Disponível em: *Cerâmica Industrial*. Acesso em: 31 jul. 2025.

LIMA, U. A. et al. *Biotecnologia industrial: processos fermentativos e enzimáticos*. São Paulo: Blucher, 2001.

LIMA, V. F. *Clarificação de soluções vegetais por métodos naturais*. Campinas: EdUFC, 2017.

LINO, M. M. et al. Estudo preliminar sobre o uso da semente de *Moringa oleifera* como coagulante orgânico. In: *Congresso Nacional de Resíduos Sólidos – CONRESOL*, 2020. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2020/I-032.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.

MACIEL, G. D.; LEAL, M. L. M. Sistema de clarificação na estação de tratamento de águas utilizando Jar-Test. *Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente*, v. 15, n. 2, p. 114–128, 2025. doi: 10.31072/rcf.v15i2.1457. Acesso em: 15 jul. 2025.

MARQUES, L. de B. et al. Tratamento de água utilizando semente de *Moringa Oleifera* em comunidades rurais. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, v. 18, n. 2, e15303, 2025. DOI: <https://doi.org/10.55905/revconv.18n.2-114>. Acesso em: 10 jul. 2025.

MACRI, R. C. V. (2014). *Extratos de moringa no tratamento do caldo de cana e reflexos sobre a fermentação alcoólica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/bitstreams/069b01ee-1470-4b14-bf37-6697d929ee72/download>

MASSELLI, I. P. A. Efeito da granulometria e da percentagem de bagaço de maçã no crescimento de *Lentinula edodes* por fermentação submersa. UNICENTRO, 2020. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/RECEN/article/viewFile/1354/1555>

MATOS, F. O.; MOURA, Q. L.; CONDE, G. B.; MORALES, G. P.; BRASIL, É. C. Impactos ambientais decorrentes do aterro sanitário da região metropolitana de Belém-PA: aplicação de ferramentas de melhoria ambiental. *Caminhos de Geografia*, v. 12, n. 39, p. 297-305, 2011. DOI: 10.14393/RCG123916593.

MEDEIROS, B. B. M. P. et al. Produção de aguardente utilizando mel de rejeito de abelhas. Universidade Federal de Campina Grande, 2020. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/jspui/handle/riufcg/20621>

MESQUITA, K.; PACHECO, H.; PINTO, J. C. Avaliação do desempenho das zeólitas REY e USY na pirólise catalítica de polietileno e resíduo plástico para a maximização da produção de nafta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 62., 2022, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: ABQ, 2022. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2022/trabalhos/8/264-573.html>. Acesso em: [07 junho 2025].

METAL CAIRO LTDA. Peneirador – Metal Cairo Ltda [Internet]. São José dos Pinhais: Metal Cairo, 2020 [citado 2025 maio 15]. Disponível em: <https://metalcairo.com.br/peneirador/>

MICHELAN, D. C. G. S.; ROSA, T. S.; SANTOS, W. N. A.; SANTOS, D. G.; JESUS, R. C. S. Uso do coagulante/floculante emergente à base de moringa no tratamento de água com verificação da composição e toxicidade do lodo produzido: tratamento de água com moringa e toxicidade do lodo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 26, n. 5, p. 955–963, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/dJ83xbnfQZKHrRMWDzqQL4k/>. Acesso em: 15 jul. 2025. doi: 10.1590/S1413-415220200314.

MIGALLÃO, M.; COSTA, A.; OLIVEIRA, F.; SILVA, J. (2006). Avaliação química e estrutural da semente de moringa. Universidade Federal do Ceará.

MIKŠÍK, F.; MIYAZAKI, T.; THU, K. Adsorption isotherm modelling of water on nano-tailored mesoporous silica based on distribution function. *Energies*, v. 13, n. 16, p. 4247, 2020.

MILHOMEM, M. P. S. Estudos de isothermas no processo de adsorção – revisão. Palmas: Universidade Federal do Tocantins, 2021. Disponível em: <https://umbu.uft.edu.br/handle/11612/3124>. Acesso em: 18 jul. 2025.

MINERALEX. Utilização da Argila Vermelha: Estética, Funcionalidade. 2025. Disponível em: <https://www.mineralex.net/utilizacao-da-argila-vermelha-estetica-funcionalidade>. Acesso em: 10 jul. 2025.

MINISTÉRIO DA SAÚDE (2025). Protocolo clínico e diretrizes terapêuticas para profilaxia pós-exposição (PEP) oral à infecção pelo HIV. Brasília: Ministério da Saúde. Disponível em: gov.br/aids

MUSEU HEINZ EBERT. MICAS – Minerais do grupo dos filossilicatos. 2023. Disponível em: <https://museuhe.com.br/site/wp-content/uploads/2018/04/Museu-HE-MICAS.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.

MUTTON, M. J. R. et al. Produção de etanol a partir de melaço tratado com extrato de sementes de moringa. *Anais Agroenergia*, 2015. Disponível em: https://anais.infobibos.com.br/agroenergia/9/Resumos/ResumoAgroenergia_2015_080.pdf

NASCIMENTO, L. S. T. do. Principais variáveis de controle no processo de fermentação em usinas sucroalcooleiras: uma revisão da literatura. UFMS, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/9049>

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S. Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. *Water Research*, Oxford, v. 32, n. 3, p. 781–791, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00295-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00295-9).

OBSERVATÓRIO DE SERGIPE. Expansão das plantações na região do Baixo São Francisco. Banco de Indicadores. Governo do Estado de Sergipe, 2023. Disponível em: <https://observatorio.se.gov.br/banco-de-indicadores>. Acesso em: 14 ago. 2025.

OCHEJA, P. A. et al. Moringa oleifera as a sustainable alternative to chemical coagulants for water purification. *Environmental Management*, [S.l.], v. 65, n. 4, p. 750–758, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-020-01269-7>. Acesso em: 22 set. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. *Nações Unidas Brasil*, 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 14 ago. 2025.

OLIVEIRA, F. L. Tratamento de dados: Isotermas de adsorção – Introdução. 2019. Disponível em: https://lipelopesoliveira.github.io/bet_1/. Acesso em: 18 jul. 2025.

OLIVEIRA, Jaqueline Mata de. Ações voltadas à redução, reutilização e reciclagem de resíduos na construção de edifícios. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, 2022. Disponível em:

https://w2files.solucaoatrio.net.br/atrio/upe-ecivil_upl//THESIS/209/

dissertao_final__jaqueline_mata_1_20230208104352694.pdf. . Acesso em: [07 junho 2025].

OLIVEIRA, L. M. Clarificação de líquidos alimentares: princípios e aplicações. 2. ed. Campinas: EdUFC, 2016.

OLIVEIRA, S. D. et al. O metabolismo das leveduras nos processos fermentativos: uma revisão. Agron Food Academy, 2022. Disponível em: Agron Food Academy. Acesso em: 31 jul. 2025.

OLIVEIRA, S. M. et al. Composição mineral de plantas alimentícias não convencionais. Revista Brasileira de Plantas Medicinai, 2021. Disponível em: https://www.sbpmed.org.br/admin/files/papers/file_vfYFrXOIIfcF.pdf

OLIVEIRA, S. M. L. et al. Composição química, atividade biológica e segurança de uso da Moringa oleifera Lam. Brazilian Journal of Natural Sciences, 2022. Disponível em: <https://bjns.com.br/index.php/BJNS/article/download/161/132>

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Metas para 2030. Nova York: ONU, 2024. Disponível em: <https://www.un.org>. . Acesso em: 24 nov. 2024.

PARESE, S.; RATO, V.; RESENDE, R.; PINTO, P.; STELLACCI, S. A methodology to qualitatively select upcycled building materials from urban and industrial waste. Sustainability, v. 14, n. 6, p. 3430, 2022. DOI: 10.3390/su14063430.

PATRÍCIO, J. S.; HOTZA, D.; DE NONI JUNIOR, A. Argilas adsorventes aplicadas à clarificação de óleos vegetais. Cerâmica, v. 60, n. 354, p.171-178, jun. 2014. DOI: 10.1590/S0366-69132014000200002.

PAULINO, R. S.; LAZARI, C. H.; MIRANDA, L. F. R.; VOGT, V. Atualização do cenário da reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 2008-2020. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 23, n. 3, p. 83-97, jul./set. 2023. DOI: 10.1590/s1678-86212023000300677.

PEIXOTO, C. A. et al. Análise físico-química do caldo de cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n. 2, p. 123–130, 2012.<https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000200007>

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PIVOKONSKÝ, M. et al. Jar Tests for Water Treatment Optimisation: How to Perform Jar Tests – a handbook. London: IWA Publishing, 2022.

PNRS, Política Nacional de Resíduos Sólidos 2010 BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 14 ago. 2025.

PORTAL SÃO FRANCISCO. Ebulliometria, Ebullioscópio, O que é. São Paulo: Portal São Francisco, 2025. Disponível em: <https://www.portalsaofrancisco.com.br/quimica/ebulliometria>. Acesso em: 18 jul. 2025.

PORVOO. Métodos de clarificação de água de ponta para 2025. Disponível em: <https://porvoo.com.cn/pt/blog/metodos-de-clarificacao-de-agua-de-ponta-para-2025>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PROJETO AMBIENTAL. Ensaio de tratabilidade para água e efluentes – Jar Test. 2025. Disponível em: <https://projetoambiental.com.br/solucoes/ensaio-de-tratabilidade-para-tratamento-de-agua-e-efluentes-jar-test/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

PUC GOIÁS. MENDONÇA, A. N. M. Avaliação do ensaio de granulometria em diferentes meios aquosos. Goiânia: PUC Goiás, 2022.

QUANTACHROME. NOVA 1000e – Surface Area & Pore Size Analyzer. Manual técnico. Boynton Beach, FL: Quantachrome Instruments, [s.d.].

RAMBALDI, E. Caminho para um Alto Conteúdo de Reciclagem em Cerâmica Tradicional. *Ceramics*, v. 4, n. 3, p. 486-501, 2021. DOI: 10.3390/ceramics4030036.

REDE METROLÓGICA RS. Protocolo nº 013/2025 – PEP em Análise de Metais em Efluente Industrial. Porto Alegre: Rede Metrológica RS, 2025. Disponível em: Protocolo oficial. Acesso em: 18 jul. 2025.

REIS, M. Moringa: 17 principais benefícios (e como fazer o chá). *Tua Saúde*, jan. 2025. Disponível em: <https://www.tuasaude.com/moringa-oleifera/>. Acesso em: 30 abr. 2025.

RIBEIRO, A. C.; SANTOS, M. J.; OLIVEIRA, F. R. Influência da granulometria na porosidade e resistência de cerâmicas refratárias. *Cerâmica*, São Paulo, v. 68, n. 386, p. 123–130, mar./abr. 2022.

RIBEIRO, A. R. M.; NASCIMENTO, C. C. F.; COSTA, J. A. M. Efeito da clarificação da água com uso de Moringa oleifera na resistência à corrosão em adutora de aço patinável. *Revista Matéria*, v. 29, n. 3, 2024. Disponível em: SciELO Brasil. Acesso em: 10 jul. 2025.

- RIBEIRO, T.; ALMEIDA, G.; SANTOS, H.; NASCIMENTO, P. (2024). Eficiência da Moringa oleifera na remoção de turbidez e cor em águas superficiais. [Estudo em andamento].
- RODRIGUES, T. A. F. Clarificação do caldo de cana-de-açúcar por aquecimento e fosfatação auxiliado por caleação e centrifugação contínua. João Pessoa: UFPB, 2017. Disponível em: Repositório UFPB. Acesso em: 31 jul. 2025.
- ROLIM, C. M. O. et al. Moringa oleifera e seus benefícios para a saúde. Revista Interdisciplinar em Saúde, v. 10, n. 1, p. 2–11, 2023. Disponível em: https://interdisciplinaremsaude.com.br/Volume_31/Trabalho_01_2023.pdf. Acesso em: 10 jul. 2025.
- SAMPAIO, J. A.; GOMES, F. Análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2021. Disponível em: https://www.academia.edu/56797137/Analise_Granulometrica_por_peneiramento. Acesso em: 18 jul. 2025.
- SANTOS, C. B. et al. Uso da Moringa oleifera como coagulante no tratamento de água: revisão da literatura. Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/7ab93b8e-6358-40bb-b46a-7fa12420439a>. Acesso em: 31 jul. 2025.
- SANTOS, D.; CARVALHO, E.; MENDES, R.; FARIAS, M. (2022). Coagulantes no tratamento de efluente hospitalar. Química Nova, 45(3), 512–519.
- SANTOS, G. R. dos. Estudo de Clarificação de Água de Abastecimento Público e Otimização da Estação de Tratamento de Água. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- SANTOS, L. R. et al. Potencialidades da Moringa (Moringa oleifera) na agricultura sustentável. In: DINIZ, V. S. S. et al. Agricultura em Bases Agroecológicas e Conservacionistas. v. II. Iporá: Instituto Federal Goiano, 2024. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/382362884>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- SANTOS, R. L. Uso da moringa oleifera como coagulante no tratamento de água: revisão da literatura. 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/8568>. . Acesso em: 04 jun. 2025.
- SCHMIDT, F. S. et al. Fermentação alcoólica: fundamentos, aplicações e perspectivas. 2. ed. Campinas: Embrapa Agroenergia, 2021.

SCHONS, E. Adsorção, isotermas e filmes monomoleculares. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2021. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/596/o/fen_int_5.pdf. Acesso em: 18 jul. 2025.

SCISIMPLE. Melhorando a clareza das imagens de ultrassom com técnicas avançadas. 2025. Disponível em: <https://scisimple.com/pt/articles/2025-06-27-melhorando-a-clareza-das-imagens-de-ultrassom-com-tecnicas-avancadas--a30qpd4>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SEBRAE. Construção civil: veja as tendências cerâmicas para 2023. Portal Sebrae, 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/construcao-civil-veja-as-tendencias-ceramicas-para-2023,e9c50c8c450d5810VgnVCM1000001b00320aRCRD>. Acesso em: 14 ago. 2025.

SEREJO, M. L. et al. Uso de coagulante natural (*Moringa oleifera*) no tratamento de esgoto sanitário por reator UASB. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2024. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anaiseletricos/19_Download/TrabalhosCompletoPDF/II-292.pdf. Acesso em: 10 jul. 2025.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO – SAAE. Análise Química – SAAE Cambuí – MG. 2025. Disponível em: <https://saaecambui.mg.gov.br/utilidades/analise-quimica>. Acesso em: 5 maio 2025.

SIDAC. Relatório de coleta de dados para o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção: blocos e telhas cerâmicos. São Paulo: SIDAC, 2022. Disponível em: https://sidac.org.br/documentos/Sidac_Blocos_e_telhas_ceramicos.pdf. Acesso em: 15 jul. 2025.

SILVA, A.; OLIVEIRA, M. (2020). Uso do sulfato de alumínio e do tanino vegetal no tratamento de água. Universidade Federal de Sergipe.

SILVA, A. S.; LIMA, M. R.; PEREIRA, C. D. Influência da clarificação na qualidade sensorial de fermentados alcoólicos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 41, p. e56521, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/e56521>. Acesso em: 22 set. 2025.

SILVA, M. C. da. Gerenciamento de resíduos sólidos na indústria de cerâmica vermelha: um estudo de caso na zona da mata pernambucana. 2019. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/8305>. Acesso em: 15 jul. 2025.

SILVA, M. V. P. Comportamento da fermentação alcoólica para produção de cachaça com e sem controle de temperatura. UFPB, 2019. Disponível em: UFPB Repositório. Acesso em: 31 jul. 2025.

SILVA, G. V.; SOUTO, J. S.; SANTOS, J. B. Cultivo de moringa: importância nutricional, uso e aplicações. Meio Ambiente (Brasil), v. 1, n. 3, p. 23–32, 2019. Disponível em: <https://www.meioambientebrasil.com.br/index.php/MABRA/article/download/38/36>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SILVA MATIAS, Gean Carlos. Compostagem e fertilizantes orgânicos: ferramentas para a gestão de resíduos sólidos. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2022. Disponível em: [//www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-tematicas/insumos-agropecuarios/anos-anteriores/compostagem-e-fertilizantes-organicos-ferramentas-para-a-gestao-de-residuos-solidos-80.pdf](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-tematicas/insumos-agropecuarios/anos-anteriores/compostagem-e-fertilizantes-organicos-ferramentas-para-a-gestao-de-residuos-solidos-80.pdf). Acesso em: [07 junho 2025].

SILVA, R.; LIMA, T.; ANDRADE, V.; FERREIRA, L. (2021). Composição físico-química de sementes de Moringa oleifera. Revista de Agroecologia e Sustentabilidade. Disponível: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/ras/article/view/4744>. Acesso em: [07 junho 2025].

SILVA, T. R. Parâmetros físico-químicos na fermentação de caldo de cana. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

SING, K. S. W. et al. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. Pure and Applied Chemistry, v. 57, n. 4, p. 603–619, 1985.

SOE PERFIS. O que é decantação? Entenda o processo que garante água tratada e sustentabilidade. 2025. Disponível em: <https://soe.ind.br/blog/decantacao-da-agua/o-que-e-decantacao-entenda-o-processo-que-garante-agua-tratada-e-sustentabilidade>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SOE Perfis. Instalação de módulos decantadores para ETAs e ETEs. SOE Tubos, Perfis e Laminados, 2025. Disponível em: <https://soe.ind.br/instalacao-modulos-decantadores>. Acesso em: 14 ago. 2025.

SNF BRASIL. Apresenta linha de coagulantes e floculantes. Hydro, 2025. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/revista/hydro/noticia/7747-SNF-Brasil-apresenta-linha-de-coagulantes-e-floculantes>. Acesso em: 10 jul. 2025.

- SOLCOVÁ, O.; SCHMIDT, H.; ZOUHAR, M. Interpretation of differential pore volume and surface area distributions in mesoporous materials. *Microporous and Mesoporous Materials*, v. 94, n. 1-3, p. 283–289, 2006. DOI: 10.1016/j.micromeso.2006.03.027
- SOUSA, J. L. U.; MONTEIRO, R. A. B. Fatores interferentes na fermentação alcoólica para produção de etanol. *FAZU em Revista*, v. 8, p. 100-107, 2011.
- STUDOCU. Validação de métodos analíticos. Universidade Estadual de Londrina, 2025. Disponível em: <https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-estadual-de-londrina/control-de-qualidade/validacao-de-metodos-analiticos/111846399>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- STURME, M.; VAN DER BERG, J. P.; KLETER, G. Precision fermentation – with a focus on food safety. Rome: FAO, 2025. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/dc0652b7-8ca5-4587-a259-a28198f59e0c/content>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- TAGLIASSACHI, M. A. et al. Clarificação de líquidos: fundamentos e aplicações industriais. São Paulo: Editora Técnica Química, 2021.
- TANKO, P. N.; TIJJANI, J. A. Application of the IUPAC classification to mesoporous adsorbents: A review. *Advanced Materials Research*, v. 1130, p. 112–119, 2018.
- TAVARES, K. Avaliação do potencial da aplicação de poliacrilamida catiônica e aniônica no processo de clarificação do caldo de cana-de-açúcar. Assis: FEMA, 2023. Disponível em: <https://cepein.femanet.com.br/BDigital/arqTccs/2311610138.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- TEGA ENGENHARIA. Teste de tratabilidade revela condições de tratamento de águas e efluentes. 2017. Disponível em: <https://tegaengenharia.com.br/artigos/teste-de-tratabilidade-revela-condicoes-de-tratamento-de-aguas-e-efluentes/>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- TEIXEIRA, M. I.; CRUZ, L. H. O.; COSTA, M. S. Uso medicinal e alimentício da Moringa oleifera no mundo: uma revisão integrativa etnobotânica. In: *Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia*. Diamantina: Even3, 2023. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/cobicet2023/665413-uso-medicinal-e-alimenticio-da-moringa-oleifera-no-mundo--uma-revisao-integrativa-etnobotanica>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- TEIXEIRA, M. I. et al. Guia 2025: Escolhendo o teste estatístico certo. Editverse, 2025. Disponível em: <https://bing.com/search?q=análise+estatística+parâmetros+analíticos+2025>. Acesso em: 10 jul. 2025.

TEKNANO AMBIENTAL. Ensaio de tratabilidade. 2025. Disponível em: <https://teknanoambiental.com.br/ensaios-de-tratabilidade/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

THOMMES, M. et al. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution. *Pure and Applied Chemistry*, v. 87, n. 9–10, p. 1051–1069, 2015. DOI: 10.1515/pac-2014-1117

THOMMES, M., KANEKO, K., NEIMARK, A. V., OLIVIER, J. P., RODRIGUEZ-REINOSO, F., ROUQUEROL, J., & SING, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>

TONCÓN-LEAL, C. F. et al. Characterization of mesoporous region by the scanning of the hysteresis loop in adsorption–desorption isotherms. *Adsorption*, v. 27, p. 1109–1122, 2021. DOI: 10.1007/s10450-021-00342-8

TORAY. Membrana de ultrafiltração de alta eficiência. 2025. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/toray-membrana-ultrafiltracao>. Acesso em: 10 jul. 2025.

VEOLIA. Ultrafiltração no tratamento de água e efluentes. 2025. Disponível em: <https://www.digitalwater.com.br/ultrafiltracao-veolia>. Acesso em: 10 jul. 2025.

TRATAMENTO DE ÁGUA. Qualidade da água – parâmetros e padrões. 2025. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/qualidade-da-agua>. Acesso em: 10 jul. 2025.

UFBA. Ensaio de granulometria. Universidade Federal da Bahia, 2018. Disponível em: geotecnia.ufba.br

UFJF. Esmeclitas – Grupo de Físico-Química de Sólidos e Interfaces. 2023. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/gfqi/linhas-de-pesquisa-old/materiais-lamelares/montmorillonitas>. Acesso em: 10 jul. 2025.

UFSC. Relatório de Jar Test – Química Tecnológica. Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

UNESP. Relatório de Química Ambiental – Ensaio de Coagulação Jar Test. Universidade Estadual Paulista, 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE. Estudo mineralógico e químico de argilas para cerâmica vermelha. Campina Grande: UFCG, 2023. (Relatório Técnico).

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Abrindo amostras para análise. Disponível em: UFMG – PDF técnico. Acesso em: 18 jul. 2025.

UNIVIÇOSA. Técnicas avançadas de tratamento de água. Blog Univicosa, 2024. Disponível em: <https://blog.univicosa.com.br/index.php/2024/06/03/tecnicas-avancadas-de-tratamento-de-agua>.

Acesso em: 10 jul. 2025.

VAZ JÚNIOR, S. Potencial do carbono renovável para a economia circular. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2023. 20 p. (Documentos / Embrapa Agroenergia, 53). Disponível em: [https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1158696/1/DOC53-2023-](https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1158696/1/DOC53-2023-Agroenergia.pdf)

Agroenergia.pdf Acesso em: 14 ago. 2025.

VEOLIA. Ultrafiltração no tratamento de água e efluentes. 2025. Disponível em: <https://www.digitalwater.com.br/ultrafiltracao-veolia>. Acesso em: 10 jul. 2025.

VIANA, H. M. F. Notas de aula prática – Mecânica dos Solos I. Universidade Federal de Viçosa, 2016. Disponível em: <https://engcivil20142.files.wordpress.com/2016/08/notas-de-aula-pratica-8-mec-solos-i.pdf> – Mecânica dos Solos I.

VIEIRA, C. M. F.; EMILIANO, J. V. Incorporação de rocha sedimentar em pó em massas para telhas cerâmicas – Parte 2: avaliação microestrutural. *Cerâmica*, v. 59, n. 352, p. 473–479, dez. 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/SxQ4vxwYmMwnNNcnSxR5Cbj/> Acesso em: 14 ago. 2025.

VISOMES. Material de referência certificado – índice de refração. São Paulo: Visomes, 2025. Disponível em: <https://www.visomes.com.br/portfolio/material-de-referencia-certificado-indice-de-refracao/>. Acesso em: 15 jul. 2025.

WALTER, A. S. et al. Estudo das características de argila para utilização em cerâmica estrutural. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2021. Disponível em: https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/58/PDF/01-021.pdf. Acesso em: 10 jul. 2025.

WANG, Y.; LI, J.; ZHANG, H. Biochar-based adsorbents for color removal in agro-industrial effluents: mechanisms and performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Amsterdam, v. 11, n. 1, p. 109–118, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109118>.

ZAMBELLI, A. R.; JANUÁRIO, F. D. Cana-de-açúcar para o processo fermentativo em usinas sucroalcooleiras. Matão: Instituto Federal de São Paulo, 2016. Disponível em: IFSP Repositório. Acesso em: 10 jul. 2025.

ZARPELON, F. Destilação do etanol. Piracicaba: STAB - Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 2020.

ZDRAVKOV, B. D. et al. Pore size distribution analysis of activated carbons based on BET and BJH methods. *Carbon*, v. 45, n. 3, p. 575–578, 2007. DOI: 10.1016/j.carbon.2006.11.005