

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Gábia Nunes Teixeira

**Estudo dos efeitos das propriedades da cal virgem dolomítica aplicada
como leite de cal no processo de clarificação do caldo de cana-de-açúcar**

Belo Horizonte

2025

Gábia Nunes Teixeira

**Estudo dos efeitos das propriedades da cal virgem dolomítica aplicada
como leite de cal no processo de clarificação do caldo de cana-de-açúcar**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Química do Instituto de Ciências
Exatas, da Universidade Federal de
Minas Gerais, como requisito para a
obtenção do título de Bacharel em
Química Tecnológica.

Orientadora: Renata Costa Silva
Araújo

Belo Horizonte

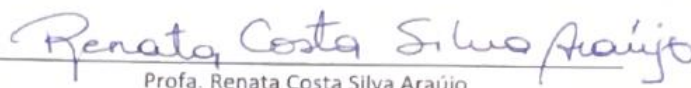
2025

UFMG

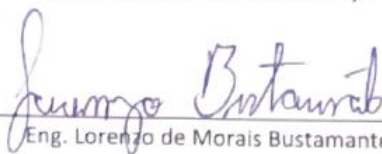
COLEGIADO DE QUÍMICA
Instituto de Ciências Exatas
Fone: (031) 3409-5799/6386
E-mail: colgradqui@icex.ufmg.br

Ata da sessão de avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso de graduação em Química Tecnológica da Universidade Federal de Minas Gerais, da aluna Gábia Nunes Teixeira, nº de registro 2018098220.

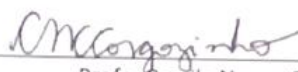
O Trabalho de Conclusão de Curso da aluna **Gábia Nunes Teixeira**, intitulado **"Estudo dos efeitos das propriedades da cal virgem dolomítica aplicada como leite de cal no processo de clarificação do caldo de cana-de-açúcar"**, foi avaliado e aprovado pela Banca Examinadora constituída por Profa. Camila Nunes Costa Corgozinho (DQ - UFMG), Me. Yara Aparecida Melo (LEC - UFMG), Profa. Renata Costa Silva Araújo (DQ - UFMG), orientadora do trabalho de conclusão de curso, e Eng. Lorenzo de Moraes Bustamante (Lhoist), coorientador do trabalho de conclusão de curso, no dia 25 de novembro de 2025.



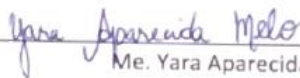
Profa. Renata Costa Silva Araújo



Eng. Lorenzo de Moraes Bustamante



Profa. Camila Nunes Costa Corgozinho



Me. Yara Aparecida Melo

Dario
Windmoller:404036960
20

Assinado de forma digital por
Dario Windmoller:40403696020
Dados: 2025.12.02 21:04:11
-03'00'

Prof. Dario Windmüller

Coordenador dos Cursos de Graduação em Química e Química Tecnológica
ICEx - UFMG

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho é a concretização de mais uma etapa importante no meu percurso acadêmico e pessoal e, por essa razão, não podia deixar de manifestar o meu agradecimento a todos aqueles que fizeram parte deste processo.

Primeiramente a Deus, por ser minha base e fonte de perseverança, a minha família por me acompanhar nessa longa jornada e ao meu companheiro, Webert, por todo apoio e incentivo. A Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e à empresa Lhoist pela oportunidade de realizar este estudo e assim desenvolver e crescer em competências e conhecimentos.

Agradeço ao meu coorientador, Lorenzo Bustamante e a equipe do TS&D, pelo seu apoio, orientação e dedicação ao longo de todo o processo.

Gratidão também à minha orientadora, Renata Costa Silva Araújo, por sua orientação e paciência.

A todos, meu muito obrigado.

“A imaginação muitas vezes nos leva a mundos que nunca existiram, mas sem isso nós não vamos a lugar algum.”

Carl Sagan

RESUMO

Neste trabalho avaliou-se o efeito da redução granulométrica da cal dolomítica micropulverizada sobre suas propriedades físico-químicas, o leite de cal produzido e sua aplicação na clarificação do caldo de cana, com o objetivo de compreender suas influências e propor alternativas para otimização do processo. A cal dolomítica foi moída em moinho pulverizador até atingir partículas superfinais e esta foi comparada com cal virgem micropulverizada, sendo analisados o tamanho de partículas por técnica de dispersão a laser, o grau de hidratação por análise térmica TGA, formação de flocos, velocidade de sedimentação, transmitância do caldo e concentrações residuais de cálcio e magnésio. A cal superfina apresentou maior teor de hidróxidos totais (67,64% comparado a cal micropulverizada 65,48%), favoreceu flocos mais densos que acelerou a sedimentação, porém, o consumo de cal para ajuste de pH não foi modificado. As análises de cálcio e magnésio residual indicaram aumento do teor de magnésio no caldo tratado com leite de cal superfino, enquanto o cálcio se manteve constante reafirmando os dados de hidróxido de magnésio encontrados na análise de TGA. Também foram comparadas as propriedades físicas dos materiais variando a concentração das amostras, os dados indicaram que a aplicação em maior concentração de sólidos, pode-se obter resultados apreciáveis, sugerindo que estudos futuros explorem o preparo do leite de cal concentrado, seguido de diluição, para avaliação de sua eficiência na clarificação.

Palavras-chave: Granulometria. Cal Dolomítica. Leite de cal. Reatividade. Processo de clarificação.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	8
1	OBJETIVO	10
1.1.	Objetivo Geral	10
1.2.	Objetivos Específicos	10
2	REFERENCIAIS TEÓRICOS.....	11
2.1	CAL DOLOMÍTICA.....	11
2.1.1	Histórico	11
2.1.2	Economia	12
2.1.3	Origem e formação	12
2.1.4	Processo da produção de cal.....	13
2.1.5	Processo de hidratação e fabricação do leite de cal	14
2.1.6	Características desejáveis e fatores que influenciam a qualidade do leite de cal	16
2.2	GRANULOMETRIA DA CAL DOLOMÍTICA.....	18
2.2.1	Classificação das partículas por tamanho	18
2.2.2	Processo de moagem	18
2.2.3	Caracterização do tamanho de partícula	20
2.3	A CANA-DE-AÇÚCAR E O PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇÚCAR VHP.....	22
2.3.1	Histórico, economia e caracterização	22
2.3.2	Composição da cana-de-açúcar e extração do caldo de cana.....	23
2.3.3	Calagem do caldo bruto	25
2.3.4	Decantação de impurezas e concentração da sacarose.....	27
2.3.5	Princípios e mecanismos da clarificação	28
3	PARTE EXPERIMENTAL	30
3.1	ANÁLISE DA CAL DOLOMÍTICA PULVERIZADAS.....	30
3.2	PREPARO DA AMOSTRA.....	31
3.3	MOAGEM DA CAL DOLOMÍTICA.....	31
3.3.1	Determinação de CaO total, MgO, Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , SiO ₂ + Resíduo Insolúvel, CO ₂ , SO ₃ e Perda ao fogo.....	32
3.3.2	Determinação da reatividade	32
3.4	PREPARO DO LEITE DE CAL	33
3.5	CARACTERIZAÇÃO DO LEITE DE CAL	33
3.5.1	Determinação da distribuição de tamanho de partícula por dispersão a laser (PSD), viscosidade e determinação do teor de sólidos	33
3.5.2	Análise térmica TGA	34

3.6	ANÁLISE DO CALDO DE CANA-DE-AÇÚCAR	34
3.6.1	Determinação do pH	34
3.7	APLICAÇÃO DO LEITE DE CAL NO CALDO DE CANA-DE-AÇÚCAR	35
3.7.1	Determinação da velocidade da decantação	35
3.7.2	Determinação da transmitância do caldo tratado	36
3.7.3	Determinação de cálcio e magnésio no caldo de cana	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA E RELAÇÃO GRANULOMÉTRICA	37
4.2	GRANULOMETRIA E REATIVIDADE.....	39
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO LEITE DE CAL	42
4.3.1	Análise do tamanho de partícula do leite de cal através da técnica de dispersão a laser (PSD)	43
4.3.2	Análise Térmica (TGA).....	47
4.4	APLICAÇÃO DO LEITE DE CAL NO CALDO	49
4.4.1	Teste de decantação.....	51
4.4.2	Medição da transmitância do caldo	52
4.4.3	Determinação de cálcio e magnésio residual.....	54
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS.....	57
	ANEXO 1 - LAUDO DE ANÁLISE DE CÁLCIO E MAGNÉSIO RESIDUAL	61
	ANEXO 2 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DA ANÁLISE PSD PARA AMOSTRA AM 1 10% M/M APÓS PERÍODO DE REATIVIDADE.....	62
	ANEXO 3 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DA ANÁLISE PSD PARA AMOSTRA AM 1 10% M/M APÓS PERÍODO DE 24 HORAS DE AGITAÇÃO	63
	ANEXO 4 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DA ANÁLISE PSD PARA AMOSTRA AM 2 SF 10% M/M APÓS REATIVIDADE	64
	ANEXO 5 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DA ANÁLISE PSD PARA AMOSTRA AM 2 SF 10% M/M APÓS PERÍODO DE 24H DE AGITAÇÃO	65

1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, a utilização de recursos minerais tornou-se essencial para a construção da civilização, bem como o desenvolvimento tecnológico e econômico do mundo. Esse fato deve-se à diversidade de aplicações destes materiais, que abrangem a manufatura de produtos, na agricultura e o uso como fontes energéticas. Os avanços tecnológicos, estudos das propriedades e exploração destes minerais continuam em expansão e, deste modo, verifica-se seu papel fundamental na sustentação e crescimento da economia. (SOARES, 2007).

Entre os produtos gerados pela exploração mineral é o calcário e o dolomito, dos quais por meio do processo de calcinação é possível obter a cal, que pode ser classificada como cal virgem calcítica e a cal virgem dolomítica, dependendo do tipo de rocha utilizada na calcinação. Estas cales se diferem pelos teores de CaO e MgO em sua composição, sendo a cal calcítica com teores de CaO entre 90% a 100% do óxido total presente e a cal virgem dolomítica com teores de CaO entre 58% a 65% do óxido total presente.

Devido às características de aglomerante, plastificante e agente neutralizador de pH, é possível aplicar a cal em diversos processos. Entre os usos principais destacam-se: na siderurgia como aglomerante, na indústria de papel e celulose para regeneração do hidróxido de sódio e branqueamento das polpas de papel, na construção civil na composição de argamassas e cimento e nas usinas de açúcar, auxiliando na remoção de compostos fosfáticos e orgânicos na etapa de clarificação (PEREIRA, FERREIRA 2009).

Na usina de produção de açúcar são realizados diversos tratamentos no caldo para purificação do açúcar, como a calagem, que consiste na adição de leite de cal, suspensão de hidróxido de cálcio, geralmente associado a um polímero para formação de flocos e posterior decantação. Também é possível encontrar tratamento com técnicas de ozonização, sulfitação combinada com calagem, além de estudos que utilizam materiais alternativos como a moringa são encontrados na literatura (COSTA; FREITA; MENDES; MUTTON, 2016). Estas variações estão associadas ao tipo de açúcar que se deseja produzir, como açúcar mascavo, açúcar cristal, demerara

bem como a busca constante de tecnologias que visam minimizar os impactos econômicos e ambientais nas etapas de tratamento (HAMERSKI, 2009).

Uma das alternativas a ser estudada para a etapa de clarificação do caldo de cana-de-açúcar é a modificação da granulometria da cal utilizada. De acordo com Silva (2007), para um leite de cal de boa qualidade, uma alta área superficial é importante, pois resulta em uma maior superfície de contato e proporciona misturas mais uniformes. Sendo assim, os parâmetros verificados para avaliação dos impactos desta modificação no processo de calagem são a relação ao consumo específico de cal por litro de caldo de cana e a estabilidade do pH e a eficiência de clarificação.

Embora a cal apresente uma extensa gama de aplicações, a divulgação de estudos e literaturas de processos utilizando cal dolomítica é bastante escassa se comparado a estudos utilizando a cal calcítica. Conforme mencionado por Silva (2018), essa escassez pode ser atribuída a uma menor disponibilidade de afloramentos geológicos de dolomitos. Contudo, destaca-se a importância desse estudo para levantamento de dados de forma a contribuir para sociedade científica e conhecimento das propriedades deste produto na aplicação da etapa do processo de clarificação do caldo de cana.

1 OBJETIVO

1.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos da variação da granulometria das cales dolomíticas, aplicadas na forma de leite de cal no caldo da cana-de-açúcar, no processo de clarificação do para obtenção do açúcar VHP.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar as amostras de cal dolomítica utilizadas no estudo, determinando suas propriedades químicas e físicas.

Reduzir o tamanho de partícula da cal dolomítica micropulverizada e caracterizar o novo produto obtido, gerando curvas de distribuição de tamanho de partícula (PSD) e dados de reatividade para comparação entre as amostras.

Comparar a performance dos diferentes produtos quanto ao consumo específico de cal dolomítica por metro cúbico de caldo tratado e à eficiência de decantação do lodo nas distintas condições de aplicação.

Avaliar os efeitos da granulometria da cal dolomítica sobre as características físico-químicas do leite de cal.

Definir condições de operação que otimizem a performance dos produtos utilizados para a aplicação.

2 REFERENCIAIS TEÓRICOS

2.1 Cal dolomítica

2.1.1 Histórico

De acordo com Rita Vecchiattini (2003), o uso do dolomito na produção de cal é mais conhecido historicamente no Norte e no Sul da Itália, mas também há registros de sua utilização na França, Alemanha e Reino Unido, especialmente entre os séculos XVI e XVII. As primeiras publicações científicas datam do século XIX, relacionadas a estudos de materiais de construção, no mesmo período em que ocorreu a descoberta do cimento Portland.

Segundo Georg's Niques (2013), misturas de cal e pozolanas, material natural ou sintético utilizados na construção civil como aditivo para cimento e concreto, já haviam sido identificados por Pages em sítios arqueológicos neolíticos. Contudo, foi apenas a partir do desenvolvimento da civilização egípcia que o produto passou a ser utilizado com maior frequência nas construções. O conhecimento de suas propriedades como aglomerante possibilitou a expansão de seu uso para outras regiões, como Grécia, Roma e áreas mediterrâneas e vizinhas.

No Brasil há registros de que a indústria da cal iniciou suas atividades em 1549, quando a produção da cal virgem era realizada a partir de conchas marinhas. A técnica de fabricação foi introduzida pela colonização portuguesa, com o objetivo de proteger casas, muros e paredes das intensas chuvas tropicais (CAMPOS; LUZ; BASTOS; NOGUEIRA, 2018).

Dessa forma, a evolução do processo industrial da cal foi consolidada no final do século XIX, com avanços em mineração, tecnologia de fornos de calcinação, combustíveis, energia, economia e recursos humanos. (SOARES, 2007).

2.1.2 Economia

A produção e a comercialização da cal é de extrema importância para o Brasil desde o século XX. Conforme mencionado por Davi Souza Pinto (2023), a localização de indústrias próximas a jazidas gera empregos para a região de instalação e, conseqüentemente, crescimento da economia local. Em geral, na região sul-sudeste predominam as cales provenientes de dolomitos e calcários magnesianos e na região nordeste-norte-centro as resultantes de calcários (SILVA, 2009).

Em 2006, a produção mundial total de cal foi estimada em 172 Mt/ano. Já em 2022, a produção total foi de 430 Mt, sendo os principais países produtores a China, os Estados Unidos, Índia, Rússia e o Brasil. Realizando uma comparação dos anos, observa-se crescimento de produção e de demandas desse material. Esse fato pode-se justificar por taxas de crescimento populacional e econômica e a diversidade de produtos derivados da calcinação de calcários (PINTO, 2023). No mercado global da cal, a cal virgem (óxido de cálcio) é predominante, mas a cal hidratada também se faz presente. Essas variações de produtos influenciam na composição e caracterizam propriedades químicas e físicas diferentes que abrem possibilidades para aplicação em diversos mercados, sendo os principais, indústrias siderúrgicas, papel e celulose e produção de açúcar (SILVA, 2009).

2.1.3 Origem e formação

A cal é um produto de uso bastante antigo que pode ser obtido a partir do calcário, uma rocha sedimentar que serve como principal matéria-prima das indústrias mineradoras que produzem e/ou comercializam esse material. O calcário pode se formar por duas rotas: a inorgânica, por deposição de sedimentos resultantes da combinação entre íons cálcio e dióxido de carbono; e a orgânica, na qual organismos vivos produzem carbonato de cálcio em suas estruturas. Diferente do calcário, os

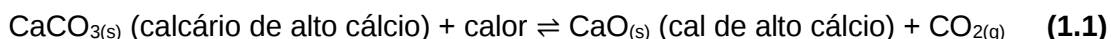
dolomitos não se formam a partir de resíduos vegetais, mas por processos de substituição de forma progressiva do cálcio por magnésio (CINCOTTO, 1961).

Sendo assim, esses processos permitem que este material possa ser classificado de acordo com o teor de cálcio e magnésio em sua composição podendo ser um material: ultra-alto-cálcio (mais de 97% de CaCO_3), alto teor de cálcio (mais de 95% de CaCO_3), carbonato de alta pureza (mais de 95% de $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$), calcítico (menos de 5% de MgCO_3), magnesiano (5 a 20% de MgCO_3) e dolomítico (20 a 40% de MgCO_3) (SANTOS, 2021).

Durante a formação do dolomito pode ocorrer incorporação de impurezas provenientes dos processos de deposição ou da substituição parcial do cálcio por outros elementos, como quartzo, silicatos argilosos, óxidos de ferro e manganês, fosfatos, sulfetos, sulfatos e fluoretos. Também podem estar presentes elementos-traço que normalmente acompanham a calcita e a dolomita, como alumínio, titânio, sódio, potássio, bário, estrôncio, chumbo, cádmio, vanádio, cromo, cobalto, níquel, cobre, gálio, zircônio, molibdênio e estanho (SOARES, 2007). Dependendo de sua concentração, essas impurezas podem restringir a aplicação do material, principalmente em mercados que exigem alta pureza em carbonatos de cálcio e/ou magnésio.

2.1.4 Processo da produção de cal

Antes de iniciar o processo de produção de cal, são realizados estudos e mapeamentos geológicos para avaliar a viabilidade de exploração da região. O dolomito adequado então é selecionado, beneficiado a partir de processos de britagem e peneiramento e encaminhado a etapa de calcinação, no qual o material é submetido a altas temperaturas em fornos específicos para promover a decomposição térmica. As transformações podem ser representadas pelas equações 1.1 e 1.2 (BOYNTON, 1980).



No processo de calcinação do dolomito, Soares (2007) menciona que a temperatura de decomposição do carbonato de cálcio ocorre em torno de 898°C, enquanto a do carbonato de magnésio ocorre entre 500 e 700°C. Boynton (1980), complementa que a temperatura para decomposição do carbonato de magnésio pode variar conforme presença de impurezas e a estrutura cristalina da rocha, especialmente ao comparar calcários dolomíticos e magnesianos e que em estudos conduzidos com três dolomitas de estruturas cristalinas diferentes, as temperaturas de decomposição variaram entre 500 e 750°C.

Segundo Cincotto (1987), algumas características do material influenciam na taxa de decomposição do dolomito, como a granulometria e a área superficial. Assim, quanto menor o diâmetro da matéria prima e maior sua área superficial, cuidados no controle do processo devem ser necessários para evitar uma supercalcinação, pois esta propicia o crescimento do cristal provocando um aumento da densidade, redução de poros e consequentemente perda da reatividade da cal virgem formada. Estes fatores podem interferir diretamente no processo de hidratação que será mencionado mais a diante.

2.1.5 Processo de hidratação e fabricação do leite de cal

A reatividade de uma substância está relacionada à sua capacidade de participar de reações químicas, influenciando diretamente a velocidade com que essas transformações ocorrem. No caso da cal calcítica e dolomítica, essa propriedade torna-se fundamental, devido a aplicação do material como reagente em diversos processos industriais, especialmente nas reações de hidratação e neutralização (CINCOTTO, 1987).

De acordo com a autora, no processo de hidratação, os óxidos de cálcio e magnésio reagem com a água formando hidróxidos de cálcio e de magnésio, podendo envolver tanto fases sólidas quanto líquidas. A partir do processo de hidratação é possível formar produtos com diferentes aspectos físicos, como sólidos, suspensões (leite de cal) ou soluções saturadas.

De acordo com Silva (2007), o óxido de cálcio e o de magnésio iniciam a hidratação simultaneamente, porém o cálcio reage com maior velocidade. Essas reações são altamente exotérmicas, liberando cerca de 211 kcal por quilograma de cal dolomítica (PARREIRA, 2010). Devido à intensa liberação de calor, é necessária a adição de água em excesso, uma vez que a hidratação de 1 kg de cal virgem calcítica pode elevar a temperatura de 2,3 kg de água de 12°C a 100°C provocando evaporação da água para reação. O excesso de água atua como regulador térmico, absorvendo parte da energia liberada e auxiliando no controle da temperatura durante o processo de hidratação (PINTO, 2023).

No processo de fabricação do leite de cal, a proporção entre água e cal utilizada é superior à estequiométrica, variando geralmente entre 2:1 e 3:1, conforme as características físico-químicas do material (SILVA, 2007). Essa proporção deve ser cuidadosamente controlada, pois quantidades inadequadas de água podem comprometer a eficiência da hidratação. Quando há adição excessiva e rápida de água, pode ocorrer o fenômeno de “afogamento da cal”, no qual a superfície dos grãos maiores ou aglomerados se hidrata rapidamente, formando uma camada compacta que reduz a porosidade e impede a penetração da água no interior das partículas, dificultando a hidratação completa (NIQUES, 2003).

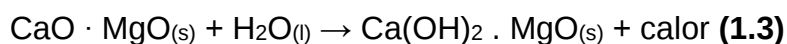
Porém, a insuficiência de água também é prejudicial, já que a reação exotérmica pode gerar pontos de aquecimento localizado, elevando a temperatura a níveis capazes de promover a desidratação dos óxidos já hidratados, comprometendo a uniformidade do processo (SILVA, 2007).

No caso da cal dolomítica, é importante ressaltar que o carbonato de magnésio (MgCO_3) se decompõe a temperaturas inferiores às do carbonato de cálcio (CaCO_3).

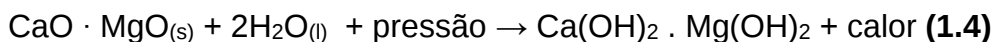
Como a calcinação deste material utiliza temperaturas mais elevadas para garantir a decomposição completa do CaCO_3 , pode ocorrer a sinterização do MgO formado, reduzindo sua reatividade e dificultando sua hidratação. Diante disso, o uso de pressão superior à atmosférica pode favorecer a hidratação completa (SILVA, 2007).

Além da aplicação de alta pressão, outras alternativas podem ser utilizadas para favorecer a hidratação do magnésio, como o tempo de maturação da cal, que pode variar entre 10 e 24 horas, resultando em teores de hidratos entre 10% e 25% (SILVA, 2007). Sendo assim, as reações envolvendo o processo de hidratação podem ser descritas segundo as equações 1.3, e 1.4 (NIQUES, 2003):

Cal dolomítica:



Cal dolomítica sob pressão:



A partir das equações mencionadas e utilizando a técnica de análise termogravimétrica (TGA) é possível determinar a quantidade de água combinada pela formação dos hidróxidos. De acordo com Niques (2003), considerando uma hidratação completa, uma cal dolomítica poderia atingir 27,2% de água combinada, porém, fatores como pureza, processo de calcinação e hidratação fazem com que este valor seja variável.

2.1.6 Características desejáveis e fatores que influenciam a qualidade do leite de cal

Para garantir a produção de um leite de cal de qualidade, algumas características precisam ser atendidas como baixa viscosidade, para evitar entupimentos nas tubulações, alta área específica e porosidade da cal para favorecer as reações químicas, composição química adequada e baixo teor de resíduos

insolúveis, para que possa realizar reações de neutralização e capacidade de coagulação e clarificação em processos industriais (SILVA, 2007).

Para atingir os parâmetros desejados, é necessário considerar as propriedades físico-químicas da cal dolomítica e os parâmetros operacionais adotados nos processos de calcinação e hidratação. Sendo assim, a granulometria é um fator crítico em ambas as etapas, uma vez que influencia significativamente a reatividade do material e o desempenho durante a preparação do leite de cal, principalmente, na produção do leite de cal, pois, partículas de dimensões maiores dificultam o processo de hidratação, enquanto partículas mais finas permanecem em suspensão por períodos prolongados, promovendo uma distribuição mais uniforme e homogênea do produto final (SILVA, 2007).

A porosidade da cal também é outro fator determinante na reatividade da cal e está diretamente relacionada à eficiência do processo de calcinação. Partículas mais porosas permitem que o contato com a água não se limite apenas à superfície (SILVA, 2007). A penetração da água nos poros, por meio de processos de adsorção e absorção, gera forças de expansão interna que promovem a desintegração completa da cal, formando pó ou gel, conforme a quantidade de água utilizada (NIQUES, 2003).

Além dessas propriedades, a qualidade da água empregada, o tempo de maturação e o grau de agitação durante o preparo também influenciam diretamente as características finais do leite de cal. Impurezas na água ou agitação inadequada podem favorecer a formação de aglomerados e reduzir a eficiência da suspensão, afetando a reatividade e a estabilidade do produto ao longo do uso (PARREIRA, 2010).

2.2 Granulometria da cal dolomítica

2.2.1 Classificação das partículas por tamanho

De acordo com Fonseca (2022), na literatura não existe uma padronização para tamanho de partículas, portanto, para a classificação de um material deve-se ter cuidado, visto que, é necessário considerar o sistema que essa partícula está incluída para defini-la. Dessa forma, o autor cita que as partículas podem ser classificadas como:

- a) Finas: partículas que variam entre 10 μm e 100 μm
- b) Ultrafinos: partículas com tamanho que variam entre 1 μm e 10 μm
- c) Coloides: partículas menores que 1 μm
- d) Médios: tamanho de partícula entre 100 μm á 500 μm
- e) Grossos: partículas com tamanhos superiores á 500 μm

2.2.2 Processo de moagem

Um dos objetivos deste trabalho é avaliar o efeito da variação granulométrica da cal dolomítica, decorrente da etapa de moagem, nas etapas de clarificação do caldo e nas características do leite de cal. A moagem é um processo que produz e necessita de alta energia, em que é capaz de promover fragmentação e alterar as propriedades do material. No entanto, alguns problemas operacionais acompanham esse processo, bem como o elevado consumo de energia, à tendência de aglomeração das partículas finas e às modificações estruturais, que podem influenciar reações químicas e características físicas da amostra devido ao alto nível de energia. Sendo assim, diversos estudos foram realizados para otimizar o processo de geração de partículas finas, desenvolvendo equipamentos que são classificados como: moinhos com meio moedor (cilíndricos, planetários, de atrição), moinhos de choque

(de pinos, de rotor, a jato) e moinhos de rolos (verticais e de alta pressão). O equipamento utilizado neste trabalho é um moinho com meio moedor Figura 1, cujo princípio de funcionamento se baseia na combinação dos mecanismos de impacto, compressão e atrito para pulverizar o material até granulometrias micrométricas. Durante a moagem, os choques mecânicos decorrentes do atrito entre os corpos moedores e as paredes internas da panela reduzem gradualmente o tamanho das partículas, aumentando a área superficial do material.

Figura 1. Moinho micropulverizador de panela



Autor: Amef Comercial Ltda

De acordo com Barros (2016), o processo de moagem pode provocar modificações na estrutura cristalina do material devido à ação termomecânica, resultando em fenômenos como redução do tamanho dos cristalitos, perda parcial de cristalinidade por deformação plástica ou até formação de fases amorfas. Essas transformações estruturais podem alterar significativamente a reatividade do material moído.

Nesse contexto, os estudos de Kalinkin, Kalinkina, Zalkind e Makarova (2005), em que investigaram as interações do óxido de cálcio (CaO) e do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) durante processos de ativação mecânica, demonstraram que, sob condições de moagem em atmosfera contendo CO_2 , ocorre a formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) amorfo. Os autores observaram que o aumento do tempo de ativação está diretamente relacionado ao incremento da conversão para carbonato,

evidenciando que a energia mecânica aplicada promove modificação estrutural do material, tornando a superfície do CaO mais reativa ao CO₂.

Os autores destacam que, embora o CaO seco não reaja com CO₂ em condições normais devido a cinética da reação limitada, traços de umidade presentes na amostra ou no gás facilitam a reação, uma vez que pequenas quantidades de água aumentam a mobilidade iônica e favorecem a formação de intermediários hidratados, que rapidamente se convertem em CaCO₃. Esse comportamento demonstra a influência da energia mecânica e da umidade na recarbonatação de materiais à base de cal, o que pode explicar o aumento do teor de CO₂ em amostras moídas. A formação de carbonato de cálcio é indesejada, pois sua baixa solubilidade em água reduz a disponibilidade de hidróxidos durante a hidratação da cal, podendo influenciar nas etapas de ajuste de pH e coagulação de impurezas no processo de clarificação do açúcar.

2.2.3 Caracterização do tamanho de partícula

O tamanho de partículas influencia em propriedades diversas dos materiais, como taxa de reação, dissolução e sedimentação. Entre as técnicas disponíveis, destacam-se o peneiramento e a dispersão a laser (PSD). Neste trabalho, ambas serão utilizadas, sendo o peneiramento utilizado para caracterização da amostra após a moagem e a análise a laser mede o espalhamento da luz causado pela interação do feixe com as partículas para caracterização do leite de cal (SANTANA, 2017).

De acordo com a autora, a dispersão a laser baseia-se no fenômeno de espalhamento da luz em todas as direções quando o feixe incide sobre partículas sólidas. Parte dessa radiação é transmitida, absorvida e dispersa, envolvendo efeitos de difração, refração e reflexão. Em partículas opacas apenas observa-se o efeito de difração da luz na sua borda. Esses padrões resultantes são registrados por meio de um arranjo de detectores, sendo que os ângulos de espalhamento são inversamente proporcionais ao tamanho da partícula. Por esse motivo, existe um limite máximo de

diâmetro de medição, pois partículas muito grandes podem produzir ângulos tão pequenos que se confundem com o feixe não espalhado.

A técnica é fundamentada principalmente nas teorias de Fraunhofer e Mie, ambas assumem as partículas em formas esféricas. A diferença entre essas abordagens é que Fraunhofer é uma aproximação visto que não considera o índice de refração do material para os cálculos do diâmetro de partícula, isto pode induzir um erro nas medições principalmente de partículas muito pequenas, pois provoca perda de intensidade de sinal por razão de processos de dispersão do feixe e absorção. Por outro lado a teoria de Mie, permite que o coeficiente varie conforme o tamanho da partícula, aumentando a exatidão das medições, porém exige o conhecimento dos índices de refração das partículas e do meio. Neste estudo, o equipamento empregado utiliza a metodologia de Fraunhofer, uma vez que as amostras avaliadas consistem em suspensões de cal cujos índices de refração não são previamente conhecidos e os sólidos em suspensão são opacos (SANTANA, 2017).

Os resultados da distribuição de tamanho de partículas para o PSD foram reportados por meio dos parâmetros D10, D50 e D98, obtidos a partir da curva acumulada de distribuição gerada pela técnica de difração a laser. Esses parâmetros correspondem aos diâmetros equivalentes para os quais 10%, 50% e 98% do volume acumulado das partículas apresentam tamanhos inferiores, permitindo descrever de forma representativa a fração fina, o diâmetro mediano e a fração grossa da amostra.

O peneiramento baseia-se na separação de partículas segundo seu tamanho, utilizando um conjunto de peneiras de aberturas conhecidas. Sob ação de um movimento vibratório, as partículas menores que o diâmetro dos orifícios atravessam a malha e são classificadas como material passante, enquanto as partículas de dimensões superiores permanecem na peneira, sendo classificadas como material retido. Dessa forma, cada peneira atua como um seletor, permitindo a determinação da distribuição granulométrica da amostra.

2.3 A cana-de-açúcar e o processo de produção do açúcar VHP

2.3.1 Histórico, economia e caracterização

A cana-de-açúcar tem uma longa história de cultivo em diversas regiões do mundo, com registros de seu uso na Indonésia e na Nova Guiné há muitos séculos. Com o passar do tempo, a cultura foi se disseminando para outras partes do mundo. No Brasil, o cultivo teve início por volta de 1532, inicialmente no estado de São Paulo, e desde então o país consolidou-se como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (HAMERSKI, 2009).

Atualmente, além do Brasil, países como Índia, Tailândia e Austrália também ocupam posições de destaque na produção mundial desse insumo agrícola. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025), as regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste concentram as maiores áreas de cultivo de cana no país. A produção nacional estimada para a safra 2024/2025 é de 676,96 milhões de toneladas, representando uma redução de 5,1% em relação à safra anterior (2023/2024). Essa redução é justificada pela mudança climática, como escassez de chuvas, contribuindo para um desempenho inferior aos anos relatados, porém, ainda assim, esse volume é considerado o segundo maior já registrado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2025).

De acordo com Hamerski (2009), o açúcar obtido a partir do processamento do caldo da cana apresenta diversas classificações, que variam conforme o processo de obtenção. Entre os tipos produzidos destacam-se o demerara, mascavo, cristal, refinado, líquido e o VHP (Very High Polarization). Apesar de o Brasil ser um dos maiores produtores mundiais, apenas cerca de 37% da produção total é destinada ao mercado interno. Para exportação, o açúcar é geralmente comercializado na forma VHP, sendo posteriormente utilizado como matéria-prima na fabricação de outros tipos de açúcares.

2.3.2 Composição da cana-de-açúcar e extração do caldo de cana

A cana-de-açúcar é uma planta tropical amplamente utilizada em diversos países para a produção de açúcar. De acordo com Lima (2017), existem cerca de trinta espécies catalogadas, sendo que essa variação decorre de cruzamentos entre diferentes espécies para melhor adaptação às condições de solo, clima e região de cultivo. A parte da planta responsável pelo armazenamento da sacarose é o colmo, sendo assim, as características químicas e físicas da cana e do caldo podem ser observadas nas faixas apresentadas na Tabela 1 (HAMERSKI, 2009).

Tabela 1. Composição da cana-de-açúcar e sólidos solúveis no caldo

COMPONENTES DA CANA-DE-AÇÚCAR	(%) em massa na cana-de-açúcar
ÁGUA	73-76
SÓLIDOS	24-27
SÓLIDOS SOLÚVEIS	10-16
FIBRA	11-16
CONSTITUINTES DO CALDO DE CANA	(%) em sólidos solúveis
AÇÚCARES	75-92
SACAROSE	70-88
GLICOSE	2-4
FRUTOSE	2-4
SAIS	3,0-4,5
ÁCIDOS ORGÂNICOS	1,5-5,5
ÁCIDOS CARBOXÍLICOS	1,1-3,0

AMINOÁCIDOS	0,5-2,5
OUTROS NÃO AÇÚCARES ORGÂNICOS	
PROTEÍNAS	0,5-0,6
AMIDO	0,001-0,100
GOMAS	0,30-0,60
CERAS, GORDURAS, FOSFOLIPÍDEOS	0,05-0,15

Autor: Adaptado (HAMERSKI, 2009)

O processo de fabricação do açúcar inicia-se nas lavouras. Normalmente, a safra da cana-de-açúcar dura de um a um ano e meio. Quando as plantas atingem o ponto ideal de maturação, a colheita é realizada de forma manual ou com uso de maquinários, removendo apenas as canas adequadas para o processamento. O material colhido é então encaminhado às usinas, onde ocorre a extração do caldo (SILVA, 2025). A obtenção do caldo pode ocorrer por moendas ou por difusores, métodos que se distinguem principalmente pela eficiência, sendo os difusores geralmente superiores. Neste trabalho, o caldo foi obtido por moendas, formadas por rolos metálicos que comprimem os colmos e promovem a liberação do líquido. Esse sistema atinge, em média, cerca de 96% de recuperação do caldo disponível (HAMERSKI, 2009).

O caldo bruto apresenta aspecto turvo, coloração entre marrom e verde-escuro. Sua composição é complexa e depende de diversos fatores, como da variedade e maturação da cana e o modo de extração (SILVA, 2025). Apesar dos fatores anteriores comentados, sua constituição pode ser descrita em um meio aquoso com a presença de açúcares, coloides, proteínas, gorduras, gomas, cera, albuminas, silicatos coloidais, pigmentos (clorofila e antocianina). Estes podem ser separados em compostos que estão em dispersão molecular como, sacarose, glicose, frutose e sais minerais (materiais solúveis) e em dispersão coloidal ou em suspensão, sendo proteínas, cores, gomas, ceras, bagaço, ar e outras impurezas (FLOCK, 2016).

O caldo bruto apresenta um pH entre 5,0 e 5,5 (LOPES, 2011), o que favorece reações indesejadas de degradação de açúcares e coloração. Os constituintes responsáveis pela sua acidez e composição. São classificados como constituintes da dispersão coloidal, os açúcares (sacarose, glicose e frutoses), sais minerais responsável pela acidez mineral e não açúcares orgânicos não nitrogenados que contribuem para a acidez orgânica (FLOCK, 2016).

Como no processo convencional de produção do açúcar VHP, não são realizadas as etapas de sulfitação (adição de dióxido de enxofre) e de fosforação (adição de fosfato de cálcio), a acidez do caldo é correspondente predominantemente da presença de ácidos orgânicos naturais da cana. Ácido acético, ácido láctico e ácido butírico, podem aparecer devido a ação de microrganismos (FLOCK, 2016).

As substâncias que constituem a suspensão coloidal são os não açúcares orgânicos nitrogenados como aminoácidos asparagina, glutamina, betaína e proteínas. Os não açúcares orgânicos nitrogenados influenciam o processo de clarificação, pois decompõem-se liberando amoníaco quando adicionado leite de cal e conseqüentemente formam sais de cálcio de aminoácido, porém, esse sal é solúvel e atua diretamente no aumento da quantidade de mel final e das perdas de açúcares (FLOCK, 2016). As proteínas podem ser desnaturadas com o processo de aquecimento e depositar-se sobre as partículas e flocos formados, conferindo carga negativa (SILVA, 2025).

De acordo com Flock (2016), existem outras substâncias que são componentes do sistema coloidal difíceis de serem removidos, portanto, necessitam de processos de aquecimento associados ao ajuste de pH para dissolução desses materiais.

2.3.3 Calagem do caldo bruto

A etapa seguinte da extração do caldo é a clarificação, essencial para a pureza e qualidade do açúcar produzido, sendo o principal objetivo elevar o pH a um valor

ótimo de forma a evitar a inversão da sacarose para a fabricação do açúcar e auxiliar na remoção de materiais insolúveis e indesejáveis. Este processo influencia diretamente as características físico-químicas, como cor, morfologia dos cristais, pureza e rendimento (FLOCK, 2016).

Dessa forma, para dar início a processo de clarificação, adiciona-se leite de cal, agente alcalinizante e coagulante, com concentração entre 10 e 15 °Bé, unidade de medida de teor de sólidos utilizada pelas usinas de açúcar, utilizando-se entre 500 a 800 gramas de cal por tonelada de cana, para ajustar o pH para a faixa de 6,8 a 7,2, o que promove a coagulação e floculação das impurezas — parâmetros definidos pela própria usina.

Segundo Lopes (2011), muitas unidades produtoras têm adotado o uso de cal dolomítica para preparar o leite de cal, pois o magnésio (Mg^{2+}) forma sais mais solúveis do que o cálcio (Ca^{2+}), o que reduz incrustações nas paredes dos evaporadores durante a evaporação do caldo.

Após a adição do leite de cal, o caldo flui para o sistema de aquecimento no qual é aquecido em trocadores de calor de feixe tubular, em que o líquido percorre o interior dos tubos enquanto o vapor aquecedor circula externamente. A temperatura é elevada para 105 a 110 °C, o que auxilia na eliminação de microrganismos, degradação de proteínas e amido, e remoção do oxigênio dissolvido (LUNA; SOARES, 2022). Esta etapa de aquecimento é muito importante visto que auxilia na velocidade das reações químicas, promove a coagulação das proteínas devido ao processo de degradação e reduz a densidade e viscosidade do meio, favorecendo a difusão de substâncias (LUNA; PEREIRA, 2022). Se o aquecimento não ocorrer, bolhas de gás que se encontram aderidas aos flocos reduzem a velocidade de decantação (FLOCK, 2016).

Embora o leite de cal atue com eficiência para precipitação de diversos não açúcares, sua atuação é deficiente para remoção dos polissacarídeos e compostos coloridos. Portanto, para aumentar a eficiência da clarificação, podem ser adicionados polieletrólitos aniônicos, geralmente copolímeros de acrilamida e acrilato de sódio de

alta massa molecular, que favorecem a floculação e decantação (HAMERSKI, 2009). Tratando-se de decantadores rápidos, se faz necessário a utilização de solução de maior concentração do polímero (LOPES, 2011).

2.3.4 Decantação de impurezas e concentração da sacarose

O processo de decantação tem início logo em seguida. A sedimentação das partículas depende de seu tamanho, forma e densidade, além das propriedades físicas do caldo, como viscosidade. O deslocamento das partículas em meio fluido pode ser descrito pela Lei de Stokes, conforme a Equação 2.6:

$$V = K \frac{D^2(d_1-d_2)g}{18\mu} \quad \text{Equação (2.6)}$$

em que:

V: velocidade de sedimentação em cm/s;

D: tamanho médio da partícula em cm;

d1: densidade da partícula em g/cm³;

d2: densidade do meio fluido em g/cm³;

g: aceleração da gravidade em cm/s²;

μ: viscosidade do líquido, Poise;

K: constante que depende da forma da partícula

O tipo de decantador também possui influências no tempo de decantação do material, em decantadores rápidos, o fluxo para separação do caldo clarificado em relação ao lodo gerado ocorre na horizontal, de forma que a velocidade vertical se torna a única componente importante na decantação, com isso, o tempo de retenção é de aproximadamente de 1 hora (LOPES, 2011).

O caldo clarificado é então filtrado e direcionado às unidades de evaporação, onde ocorre a concentração da sacarose por meio da remoção parcial da água (LOPES, 2011). Nessa etapa, é possível verificar a importância da produção de um leite de cal de qualidade e a utilização de cal dolomítica para o preparo do mesmo,

uma vez que, conforme César e Caruso (2003), na evaporação podem ocorrer formações de sais de cálcio e magnésio os quais geram incrustações nas tubulações. Os sais de magnésio apresentam maior solubilidade e são mais facilmente removidos em comparação aos sais de cálcio. Por essa razão, o uso da cal dolomítica tem se tornado cada vez mais frequente no processo industrial.

Em seguida, a solução concentrada segue para a cristalização, centrifugação e secagem, originando o açúcar VHP (Very High Polarization). O lodo gerado durante a clarificação é filtrado, o líquido é reaproveitado no processo, e o resíduo sólido é utilizado como adubo agrícola (LOPES, 2011). Na figura 2, é possível acompanhar a o fluxograma da fabricação do açúcar.

Figura 2. Processo generalizado de fabricação do açúcar



Autor: Adaptado (UNICA, 2025)

2.3.5 Princípios e mecanismos da clarificação

Segundo Lima (2017), coloides são partículas com dimensões lineares entre 1 e 1000 nm, causam turbidez, modificam a cor e constituem sistemas compostos por duas fases: uma fase dispersa, formada pelas partículas em suspensão, e uma fase dispersante, que corresponde ao meio líquido. Considerando as características do caldo de cana, Hamerski (2009) destaca que seu sistema coloidal é constituído

principalmente por ceras, gorduras, proteínas, corantes, dextranas e amido. Essas partículas apresentam elevada área superficial, tornando-se mais sensíveis a fenômenos de superfície do que à ação da gravidade, o que resulta na formação de suspensões estáveis.

A estabilidade dessa suspensão depende das propriedades elétricas que criam uma força de repulsão entre as partículas. A repulsão eletrostática é causada pela diferença de potencial elétrico entre as partículas e o meio dispersante, impedindo que as partículas se aglomerem. Devido ao pequeno tamanho das partículas, métodos convencionais de separação sólido-líquido não são eficazes para esse tipo de sistema. Por isso, reduzindo ou neutralizando a diferença de potencial pela ação de algum agente, como adição de leite de cal para ajuste de pH, polímero e aquecimento durante a clarificação, as partículas aproximam-se, aglomeram-se e iniciam o processo de desestabilização do sistema coloidal. Essa desestabilização permite posteriormente, a aplicação de métodos físicos de separação das fases, como a decantação ou filtração (LIMA, 2007) (HAMERSKI, 2009).

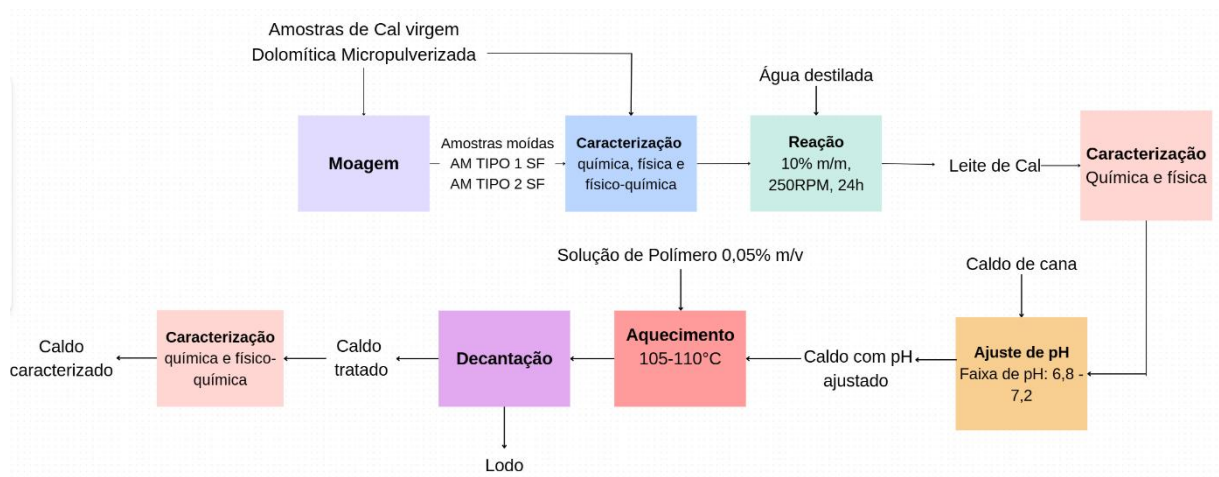
3 PARTE EXPERIMENTAL

3.1 Análise da cal dolomítica pulverizadas

A cal dolomítica utilizada para este estudo é uma cal que possui granulometria do material de origem de 10 a 40 mm e posteriormente passou por um processo de micropulverização. Sendo assim, antes da realização dos testes, foi feita a caracterização deste material para posterior correlação com os dados da cal dolomítica moída.

Conforme discutido anteriormente, após a descrição detalhada das etapas relacionadas às influências da matéria-prima na produção do leite de cal, aos parâmetros de qualidade e ao processo de obtenção do açúcar, foi elaborado um fluxograma Figura 3 que representa, de forma sistemática, os processos abordados neste trabalho.

Figura 3. Fluxograma do processo experimental para produção e aplicação do leite de cal dolomítico na clarificação do caldo de cana



Autor: Próprio

3.2 Preparo da amostra

Selecionou-se uma amostra de cal dolomítica micropulverizada, esta foi homogeneizada e quarteada manualmente, gerando a identificação:

- AM 1: cal dolomítica micropulverizada

3.3 Moagem da cal dolomítica

Para moagem da amostra AM 1 foi estabelecido um perfil granulométrico a ser atingido, sendo 100% de material passante em peneiras de 1,00 mm, 100#, 200# e 10% de material retido em peneira de 325 #. A moagem foi realizada em moinho pulverizador de panela, marca AMEF modelo AMP-1A com 150 g de amostra a cada batelada de 320 segundos até atingir aproximadamente 3 Kg de amostra. Após avaliação dos dados desta aplicação, decidiu-se reduzir mais a granulometria do material, de modo a atingir 100% de material passante em peneira de 325#. O tempo estabelecido para moagem de forma que atinja o critério estabelecido foi de 450 segundos.

O equipamento possui uma panela circular na qual a amostra é inserida juntamente com os corpos moedores, que podem ser anéis e um tarugo (sólido maciço cilíndrico), conforme ilustrado na figura 1. Após o carregamento, a panela é devidamente vedada. O conjunto é acoplado a uma base vibratória ou sistema de alta rotação, que opera tipicamente entre 750 e 1500 rpm, gerando movimentos intensos responsáveis pela fragmentação das partículas (HERZOG, 2019).

As amostras moídas foram identificadas conforme a tabela 2. O termo SF refere-se a amostra superfina moída a partir da cal dolomítica micropulverizada.

Tabela 2. Identificação das amostras de estudo

Amostra	Característica
AM 1	Amostra micropulverizada
AM 1 SF	Amostra com 10% de retido em peneira de 325#
AM 2 SF	Amostra com 0% de retido em peneira de 325#

3.3.1 Determinação de CaO total, MgO, Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂ + Resíduo Insolúvel, CO₂, SO₃ e Perda ao fogo.

Foram realizados ensaios em triplicata para determinação de óxidos de cálcio, magnésio, alumínio e ferro, óxido de silício mais resíduo insolúvel por via úmida, determinação de óxido de cálcio disponível, determinação de CO₂, SO₃ e perda ao fogo por calcinação utilizando com referência os métodos descritos na norma ABNT NBR 6473:2003 Cal virgem e cal hidratada – Análise.

3.3.2 Determinação da reatividade

A reatividade permite avaliar tanto a duração do processo de hidratação quanto a temperatura máxima resultante da liberação de calor da reação. Para essa determinação, a cal é misturada à água e a variação de temperatura é registrada ao longo do tempo, possibilitando a construção da curva de hidratação e a análise dos parâmetros característicos do ensaio. O procedimento segue as recomendações da norma ASTM C110-09 Método de Ensaio Padrão para Ensaaios Físicos de cal viva, cal hidratada e calcário (Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone).

3.4 Preparo do leite de cal

Em um béquer de 2 litros, preparou-se 1 litro de leite de cal de concentração de 10% m/m (9-10°Bé¹), utilizando-se as amostras de cal dolomítica micropulverizada e superfina com a temperatura da água destilada à 40°C sob agitação de 250 RPM por período de 24 horas com auxílio de um agitador mecânico Fisatom modelo 723S com haste tipo hélice de duplo anel.

3.5 Caracterização do leite de cal

3.5.1 Determinação da distribuição de tamanho de partícula por dispersão a laser (PSD), viscosidade e determinação do teor de sólidos

A caracterização do leite de cal foi realizada por meio de análises de distribuição granulométrica, viscosidade e teor de sólidos totais, conforme procedimentos operacionais internos estabelecidos pelo laboratório.

As análises de PSD foram realizadas utilizando o modelo óptico de Fraunhofer, após diluição de 1 parte de leite de cal para 4 partes de álcool etílico 95% P.A da marca FMAIA, para garantir dispersão adequada. As medições foram feitas no analisador Beckman Coulter LSI 3320, faixa de medição 0,375 a 2000 µm, permitindo comparar o perfil granulométrico após a reatividade e após 24 horas de agitação.

A viscosidade do leite de cal foi determinada utilizando um viscosímetro rotacional Brookfield, modelo LVDV-II, equipado com spindle nº 1, conforme procedimento operacional interno.

¹ Bé: Graus Baumé – Medição da densidade ou gravidade específica de líquidos utilizada na usina de açúcar.

O teor de sólidos totais foi obtido por meio de uma termobalança Sartorius, modelo MA35, também seguindo o procedimento interno. O método baseia-se na perda de massa por aquecimento controlado, permitindo a determinação gravimétrica da fração sólida presente na amostra.

3.5.2 Análise térmica TGA

Realizou-se filtração a vácuo do leite de cal após o processo de aplicação no caldo de cana, utilizando papel filtro faixa branca e lavando-se a amostra com álcool etílico 95% da marca FMAIA para pausar o processo de hidratação. A amostra foi seca em estufa á 100°C por período de 3 horas. Para verificar a eficiência de hidratação das amostras, realizou-se análise de termogravimétrica (TGA), com equipamento da LECO, modelo TGA801, utilizando atmosfera de nitrogênio, 3,5 L/min, com taxa de variação de temperatura de 10 °C/min e uma rampa de temperatura de 25 °C á 1000 °C, conforme procedimento interno.

3.6 Análise do caldo de cana-de-açúcar

O caldo de cana bruto foi coletado após o processo de moagem da cana por moendas na usina de açúcar. As amostras foram homogeneizadas e congeladas. As porções foram descongeladas conforme programação dos testes.

3.6.1 Determinação do pH

O pH foi determinado utilizando um medidor de pH Digimed, modelo DM220 calibrado aos valores de pH 4,00, 7,00 e 10,00.

3.7 Aplicação do leite de cal no caldo de cana-de-açúcar

Foram preparadas três alíquotas de caldo no volume de 1 L para cada amostra de leite de cal. Após a medição do pH inicial, adicionou-se o leite de cal com auxílio de seringa de 3 mL, sob agitação constante, até atingir pH entre 6,8 e 7,2. O consumo de cal foi determinado por gravimetria em balança analítica Sartorius (Entris II – Essencial). Em seguida, o caldo ajustado foi aquecido até aproximadamente 90 °C com auxílio de um ebulidor e adicionou-se 2 mL da solução de polímero aniônico a 0,05% m/v Praestol DW30, fabricante Solenis. Posteriormente, o caldo foi transferido para proveta de 1 L para realização do teste de velocidade de decantação.

3.7.1 Determinação da velocidade da decantação

Para a realização do ensaio, utilizou-se uma proveta de 1 L, na qual foi aplicada previamente uma faixa branca ao longo da graduação, a fim de facilitar a visualização do decaimento do lodo. Após a aplicação do polímero ao caldo de cana, o volume da amostra foi transferido cuidadosamente para a proveta, iniciando-se imediatamente a contagem do tempo com auxílio de um cronômetro.

A cada 10 segundos, durante um período total de 60 segundos, registrou-se na faixa branca, a posição da interface entre o lodo e o sobrenadante, tomando como referência a graduação da proveta. Esse procedimento permitiu acompanhar a taxa de sedimentação do lodo ao longo do tempo.

Este teste de bancada é rotineiramente empregado na usina para avaliar a eficiência do processo de decantação adotado, possibilitando a comparação do desempenho entre diferentes condições operacionais.

3.7.2 Determinação da transmitância do caldo tratado

Após o teste de velocidade da decantação, aguardou-se por 1 hora, transferiu-se a parte sobrenadante para um pote e coletou-se uma alíquota para realizar a medição da transmitância da amostra. Aguardou-se a amostra atingir a temperatura ambiente para realizar as medições. Foi realizada uma varredura no espectro de 400 nm a 760 nm em espectrofotômetro HP 8451, marca HP, para verificar o comprimento de onda que possui menor absorbância da coloração da amostra. Verificou-se que o comprimento de onda de 760 nm apresentava menor absorbância, portanto, este foi determinado como parâmetro para medição da transmitância. Não foi realizado nenhum tratamento na amostra para medição da transmitância.

3.7.3 Determinação de cálcio e magnésio no caldo de cana

As replicatas para análise de cálcio e magnésio foram identificadas como AM TIPO 1-1, AM TIPO 1-2 sendo referente aos testes realizados com a amostra AM 1 e alíquotas AM TIPO 1-1SF, AM TIPO 1-2 SF referente aos testes realizados com a amostra AM 2 SF e o caldo sem tratamento como caldo de cana. Este ensaio foi realizado por laboratório terceirizado, conforme Standard Methods for the examination of water and wastewater 23th (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Composição química e relação granulométrica

Para as amostras de cal dolomítica cuja composição química está apresentada na Tabela 3, observaram-se resultados consistentes e constantes, o que era esperado, uma vez que não foi realizada nenhuma modificação que influenciasse na composição química da amostra.

Tabela 3. Composição química e granulometria das amostras de Cal dolomítica

PARÂMETRO	AM 1	AM 2 SF
% CaO Total	65,48 ± 0,18	65,57 ± 0,05
%MgO	25,27 ± 0,03	24,90 ± 1,23
%Fe ₂ O ₃	0,55 ± 0,02	0,56 ± 0,02
%Al ₂ O ₃	0,63 ± 0,03	0,63 ± 0,09
%SiO ₂ + RI	3,21 ± 0,06	3,28 ± 0,19
%PPC	4,48 ± 0,32	5,33 ± 0,14
%CO ₂	2,41 ± 0,06	2,57 ± 0,05
%S	0,10 ± 0,01	0,09 ± 0,02
%RETIDO EM 1,00MM	0,50	0,00
%RETIDO ACUMULADO EM 100#	13,20	0,00
%RETIDO ACUMULADO EM 200#	21,00	0,00
%RETIDO ACUMULADO EM 325#	24,20	0,00

RI: Resíduo insolúvel; PPC: Perda por calcinação

Porém, um aumento nos valores de PPC e CO₂ para a amostra moída (AM 2 SF) é observado. Esse comportamento pode ser atribuído à manipulação física da amostra, uma vez que a cal é um material higroscópico, capaz de absorver umidade do ambiente, o que favorece processos de recarbonatação. Além disso, o processo termomecânico de moagem, devido à alta energia aplicada, pode provocar alterações

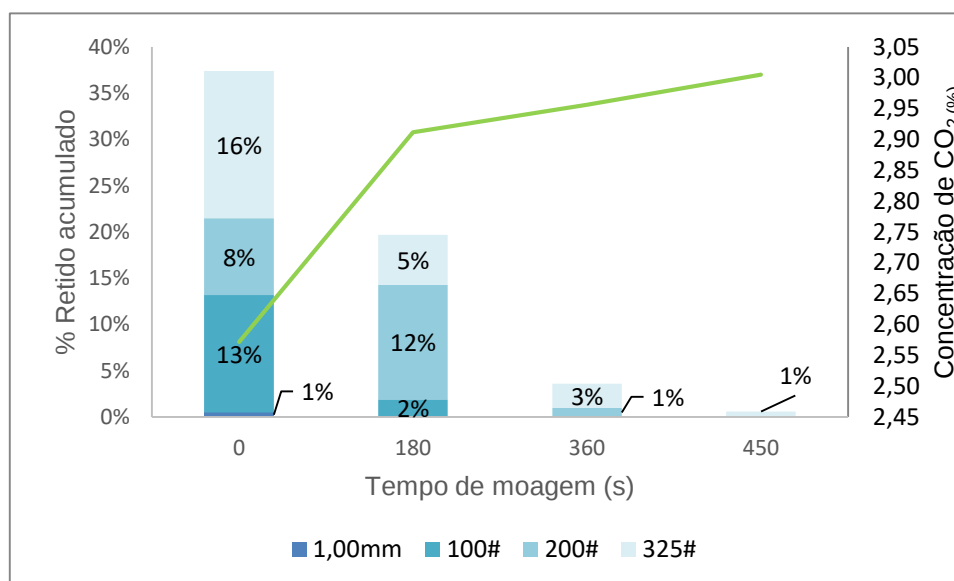
estruturais no material, aumentando sua reatividade e, conseqüentemente, seu potencial de interação com o CO₂ atmosférico.

Esse efeito é evidenciado na Figura 4, que apresenta a evolução da concentração de CO₂ em função do tempo de moagem, com medições realizadas em triplicata para cada ponto. À medida que o tempo de moagem aumenta, ocorreu redução do tamanho das partículas e aumento da área superficial, fatores que, associados às condições termomecânicas e à presença de umidade, intensificam a interação com CO₂ e elevam sua concentração.

A taxa de incremento na concentração de CO₂ é mais acentuada nos primeiros 180 segundos de moagem. Após esse período, a variação torna-se menos expressiva, mantendo-se próxima ao valor final obtido aos 450 segundos. Essa tendência está diretamente relacionada ao comportamento granulométrico ilustrado na Figura 4, que mostra que, até aproximadamente 180 s, ocorre a maior redução no tamanho das partículas médias, caracterizando o período de moagem mais intensa.

A partir desse intervalo, a diminuição do tamanho das partículas torna-se menos significativa, indicando que a maior parte do material de granulometria média já foi reduzido. Assim, conforme os dados apresentados, sugere-se que as novas superfícies expostas nos primeiros instantes da moagem são as mais ativas para interagir com o CO₂, enquanto as etapas posteriores apresentam apenas ajustes finos na granulometria, com menor impacto na reatividade do material.

Figura 4. Gráfico de distribuição granulométrica e aumento da concentração de CO₂ em função do tempo de moagem

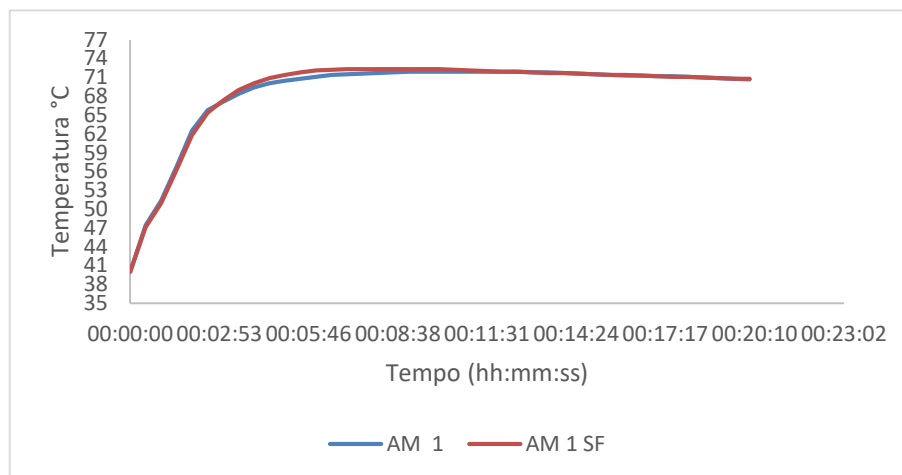


Autor: Próprio

4.2 Granulometria e reatividade

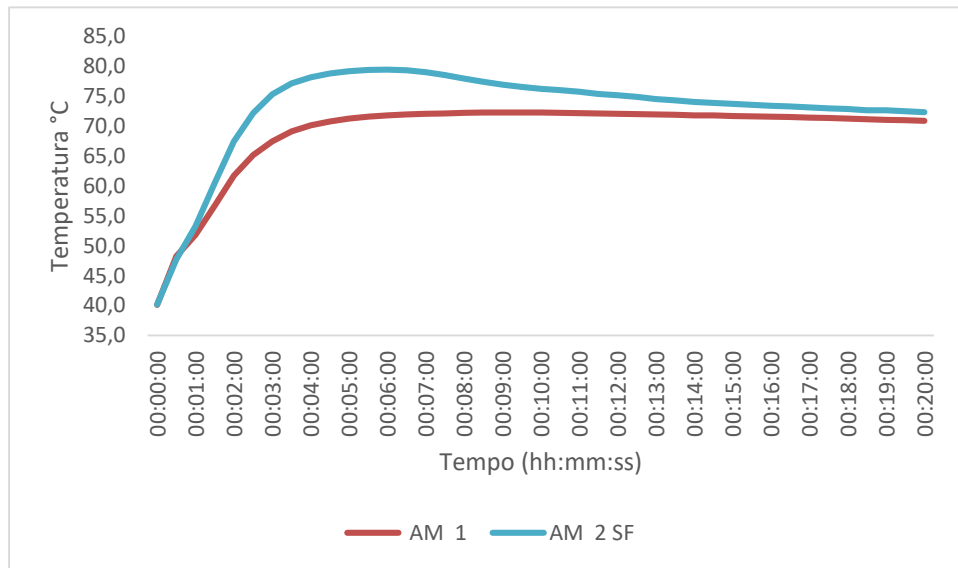
O método para reatividade da amostra de cal de acordo com a ASTM C110-20 menciona uma proporção de 120 gramas de cal em 400 mL de água deionizada. Assim, a reatividade das amostras AM 1 e AM 1 SF foi inicialmente registrada conforme o método normativo ASTM C110-20. No entanto, para as aplicações no processo de clarificação do caldo de cana, o leite de cal foi preparado com concentração de 10% m/m conforme procedimento da usina.

Figura 5. Gráfico da análise de reatividade das cales AM 1 e AM 1 SF na concentração de 30% m/v



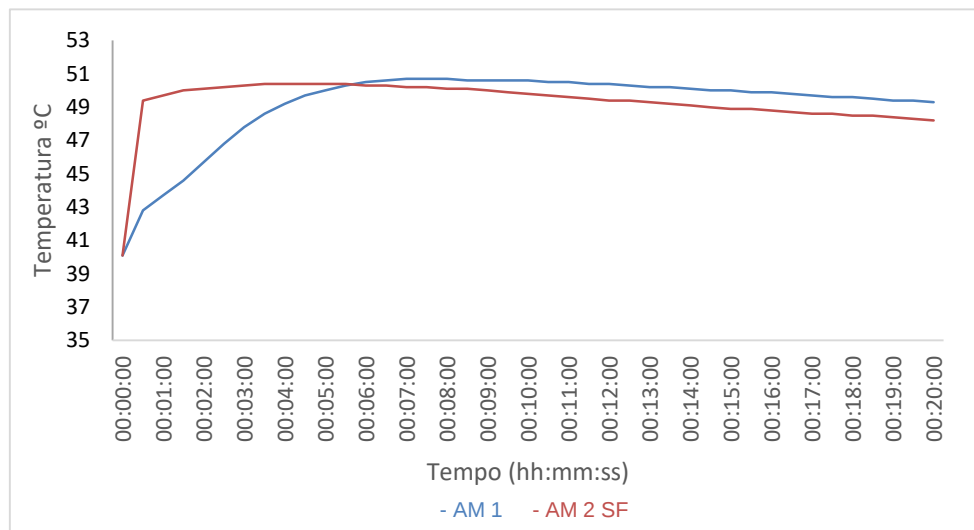
A amostra AM 1 SF apresenta granulometria mais fina em relação à AM 1, resultado do processo de moagem. Conforme ilustrado na Figura 5, observa-se o que já foi apontado por Silva (2007) o aumento da área superficial específica tende a intensificar a reatividade da cal. Embora ambas as amostras tenham atingido temperaturas máximas semelhantes, 71,9°C para AM 1 SF e 72,3°C para AM 1 SF durante o teste, os tempos para alcançar esse pico foram distintos, aproximadamente 9 minutos para a AM 1 e cerca de 7 minutos para a AM 1 SF. O mesmo teste foi realizado para comparar as amostras AM 1 e AM 2 SF conforme dados da Figura 6.

Figura 6. Gráfico da análise de reatividade das cales AM 1 e AM 2 SF na concentração de 30% m/v



A análise de reatividade confirma que a granulometria afeta diretamente a velocidade e a intensidade da hidratação da cal. A amostra AM 2 SF, mais fina, atingiu 79,5 °C com um período de tempo menor (6 minutos), enquanto a AM 1, mais grossa, alcançou 72,3 °C de forma mais lenta (9 minutos), devido à menor área superficial disponível para reação. Esses resultados reforçam a tendência observada, quanto menor o tamanho das partículas, maior a reatividade. Para verificar se esse comportamento se mantém no preparo do leite de cal a 10% m/m, realizou-se um novo teste de reatividade nas condições de processo, apresentado na Figura 7.

Figura 7. Gráfico da análise de reatividade das cales AM 1 e AM 2 SF na concentração de 10% m/m



Ao ajustar o preparo do leite de cal para a concentração de 10% m/m, verificou-se uma redução significativa das temperaturas máximas de hidratação, que passaram a valores próximos de 51 °C, inferiores aos observados nos testes anteriores (>70 °C). Como a única variável alterada foi a concentração, infere-se que esta atua como fator limitante da intensidade térmica da reação. Ainda assim, a diferença entre os perfis cinéticos permanece evidente, sendo que a amostra AM 2 SF, de granulometria mais fina, apresentou rápida elevação de temperatura nos primeiros 30 segundos, indicando comportamento de cal muito reativa, enquanto a AM 1 atingiu temperatura semelhante apenas após cerca de 6 minutos. Esses resultados confirmam que tanto a granulometria quanto a concentração do leite de cal influenciam diretamente a velocidade de reação de hidratação.

4.3 Caracterização do leite de cal

O leite de cal foi caracterizado conforme o teor de sólidos, viscosidade, graus Baumé, diâmetro de partícula por dispersão a laser e do seu sólido seco foi realizada análise de termogravimetria.

Tabela 4. Resultados da caracterização física do leite de cal á 10% m/m após período de 24 horas de agitação

AMOSTRA	% TEOR DE SÓLIDOS	VISCOSIDADE (cP) 100 RPM	GRAUS BAUMÉ °
AM 1	11,11 ± 0,02	16,50 ± 0,1	9,0
AM 1 SF	10,91 ± 0,01	16,00 ± 0,3	9,0
AM 2 SF	10,99 ± 0,01	16,40 ± 0,1	9,0

Os resultados da Tabela 4 mostraram que a variação da granulometria não alterou significativamente as propriedades físicas dos leites de cal após 24 horas de reação. O teor de sólidos, viscosidade e graus Baumé permaneceram praticamente constantes. Isso pode ser justificado porque, na concentração de 10% m/m, o sistema é predominantemente líquido, reduzindo as interações partícula-partícula e, consequentemente, a resistência da suspensão, conforme discutido por Narashima et al. (2008).

O autor também menciona que, em sistemas diluídos, a viscosidade cresce quase linearmente com a concentração, ao passo que em sistemas concentrados as interações entre partículas se tornam predominantes. Essa relação é coerente com os resultados aqui obtidos para o leite de cal à concentração de 10% m/m, em que a variação da granulometria não provocou diferenças significativas na viscosidade, o que se sugere a fase líquida controla o escoamento e as interações sólidas são minimizadas.

4.3.1 Análise do tamanho de partícula do leite de cal através da técnica de dispersão a laser (PSD)

Após as medições de tamanho de partículas por dispersão a laser, os parâmetros D10, D50 e D98 que correspondem aos diâmetros equivalentes para os quais 10%, 50% e 98% do volume acumulado das partículas apresentam tamanhos inferiores, foram selecionados para caracterizar o perfil granulométrico das amostras, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados da análise de PSD do leite de cal em concentração 10% m/m

AMOSTRA	Média D10 (μm)	Média D50 (μm)	Média D98 (μm)
AM 1	1,782	9,273	99,75
AM 1 SF	1,978	11,93	103,1
AM 2 SF	2,772	13,75	100,9

Os dados iniciais não foram suficientes para estabelecer, de forma conclusiva, o efeito da moagem sobre a distribuição granulométrica, possivelmente em função da baixa representatividade amostral. Tal limitação está associada ao fato de a amostra AM 1 apresentar maior proporção de partículas de maior diâmetro, as quais tendem à sedimentação rápida, comprometendo a homogeneidade da suspensão durante a coleta.

Para aumentar a confiabilidade dos resultados, procedeu-se à realização de novas análises tabela 6, utilizando três alíquotas por amostra, cada uma analisada em duplicata, contemplando ainda medições após a estabilização de temperatura da amostra no ensaio de reatividade e após 24 horas de agitação, a fim de verificar eventuais fenômenos de aglomeração. As médias obtidas são apresentadas na Tabela 6. O teste não foi realizado com a amostra AM 1 SF, pois a partir dos dados anteriores decidiu-se trabalhar somente com as amostras AM 1 e AM 2 SF. Os dados completos da análise podem ser acompanhados nos anexos 2, 3, 4 e 5.

Tabela 6. Resultados da análise de PSD do leite de cal em concentração 10% m/m após reatividade e após período de 24 horas de agitação

AMOSTRA	Condição de medição	Média D10 (μm)	Média D50 (μm)	Média D98 (μm)
AM 1	Após reatividade	$2,76 \pm 0,10$	$12,70 \pm 0,41$	$149,50 \pm 30,04$
AM 2 SF	Após reatividade	$2,96 \pm 0,15$	$15,42 \pm 0,43$	$96,65 \pm 8,17$
AM 1	Após 24h de agitação	$2,11 \pm 0,11$	$9,12 \pm 0,63$	$196,90 \pm 66,24$
AM 2 SF	Após 24h de agitação	$2,72 \pm 0,10$	$15,63 \pm 0,67$	$114,80 \pm 7,38$

Conforme apresentado na Tabela 7, aplicou-se o teste F para avaliar se a média dos grupos são significativamente diferentes. Como pode-se verificar o teste F indicou ausência de diferença estatística quando cada amostra é comparada entre si nos dois tempos de análise (após a reatividade e após 24 horas), aceitando-se a hipótese nula, ou seja, as médias não se diferem. A partir dos dados estatísticos pode-se sugerir que não ocorreram alterações significativas na granulometria ao longo do período de agitação, descartando evidências de aglomeração ou fracionamento adicional das partículas. Tal estabilidade é relevante, pois indica que o perfil granulométrico obtido após a moagem superfina se mantém ao longo do tempo, sugerindo, inclusive, que o prolongamento do processo por 24 horas de agitação pode não ser necessário para a redução do diâmetro de partículas, porém, os teores de óxidos hidratados precisam ser monitorados.

Por outro lado, ao comparar as amostras AM 1 e AM 2 SF, a hipótese nula é rejeitada, confirmando que as distribuições granulométricas diferem estatisticamente, resultado consistente com o efeito esperado da moagem superfina sobre a redução e uniformização da fração mais grossa.

Tabela 7. Teste F para comparação das amostras na concentração de 10% m/m

Amostra	Processo de comparação	F calculado	F teórico	Hipótese
AM 1 e AM 2 SF	Após reatividade	13,52	5,05	Rejeita a hipótese nula
AM 1 e AM 2 SF	Após 24 horas de agitação	80,65	5,05	Rejeita a hipótese nula
AM 1	Após reatividade e 24h de agitação	0,21	5,05	Aceita a hipótese nula
AM 2 SF	Após reatividade e 24h de agitação	1,23	5,05	Aceita a hipótese nula

O mesmo teste foi realizado com as amostras AM 1 e AM 2 na concentração de 30% m/v, concentração utilizada para teste padrão de reatividade, para afirmar a influência da concentração na redução de partículas devido maior reatividade, os dados encontrados estão na tabela 8.

Tabela 8. Análise de PSD de amostras em concentração 30% m/v

AMOSTRA	Processo de comparação	Média D10 (µm)	Média D50 (µm)	Média D98 (µm)
AM 1	Após reatividade	3,00 ± 0,11	13,37 ± 0,56	146,67 ± 24,65
AM 2 SF	Após reatividade	2,67 ± 0,07	12,58 ± 0,12	54,95 ± 0,75
AM 1	Após 24 horas de agitação	2,37 ± 0,08	10,64 ± 0,29	124,5 ± 16,17
AM 2 SF	Após 24 horas de agitação	2,31 ± 0,11	12,03 ± 0,21	53,32 ± 2,32

A Tabela 8 confirma que a amostra AM 2 SF apresenta uma distribuição de partículas mais fina e homogênea em comparação à AM 1, diferença já observada previamente, mas que se torna mais evidente na concentração de 30% m/v. Após 24 horas de agitação, ambas as amostras mostram pequenas reduções nos valores médios, sem alteração significativa no perfil granulométrico, indicando estabilidade do

sistema, em contraste com o comportamento observado a 10% m/m, no qual houve aumento no tamanho de partícula, especialmente em D50 e D98. Portanto, verifica-se que a concentração mais elevada (30% m/v), proporciona uma redução maior das partículas devido aumento da reatividade (temperatura da reação).

Nesse contexto, ao considerar as diferentes concentrações, observa-se que a amostra AM 2 SF a 10% m/m não reproduziu o mesmo perfil granulométrico obtido a 30% m/v. Esse resultado pode ser atribuído à menor intensidade de interação partícula-partícula em sistemas mais diluídos, reduzindo o atrito interno e os efeitos de desaglomeração que são favorecidos em concentrações mais elevadas, bem com temperaturas mais elevadas nas amostras de concentração 30% m/v favorecendo a redução do tamanho de partículas. Assim, fica evidente que a concentração de sólidos exerce influência direta no refinamento da distribuição granulométrica final.

4.3.2 Análise Térmica (TGA)

A partir dos dados das análises térmicas, figuras 8 e 9 foi possível identificar os eventos de desidroxilação característicos dos hidróxidos presentes. O termo água combinada refere-se à água liberada durante a quebra das ligações hidroxila (-OH) de fases hidratadas, como Ca(OH)_2 e Mg(OH)_2 . Assim, a partir da quantidade de água combinada liberada nas etapas térmicas, torna-se possível estimar o teor de hidróxidos nas amostras com base nas relações estequiométricas das reações de desidroxilação.

Figura 8. Curva de TG AM 2 SF

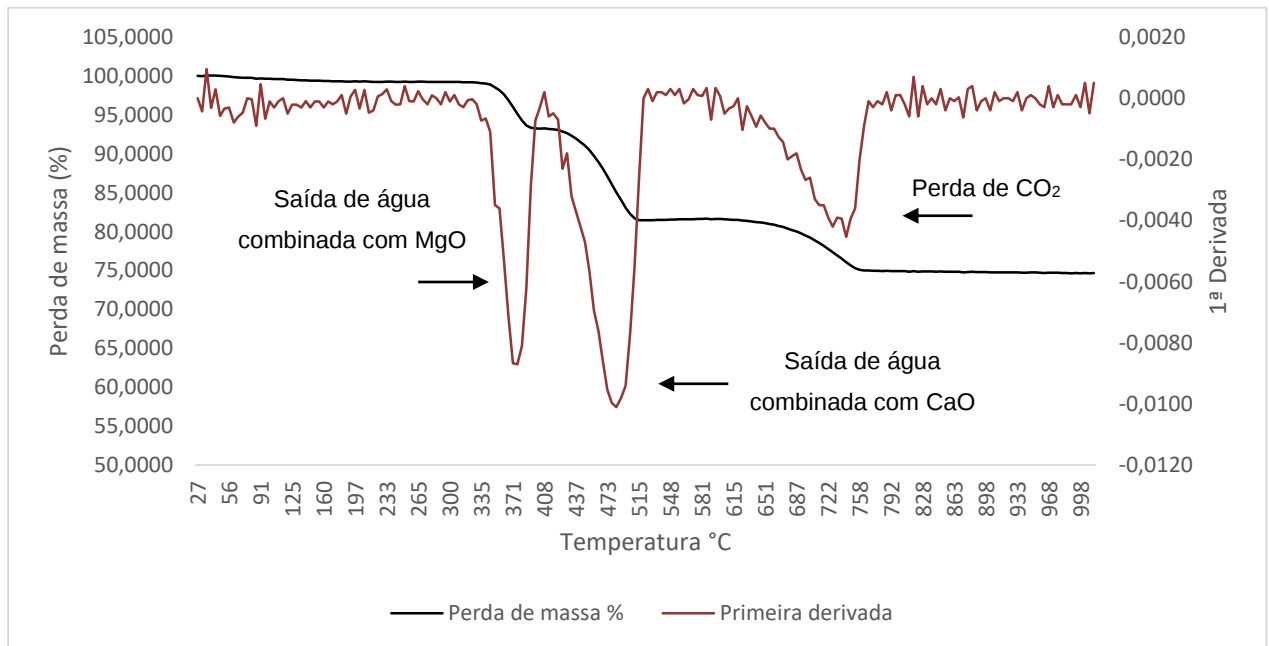
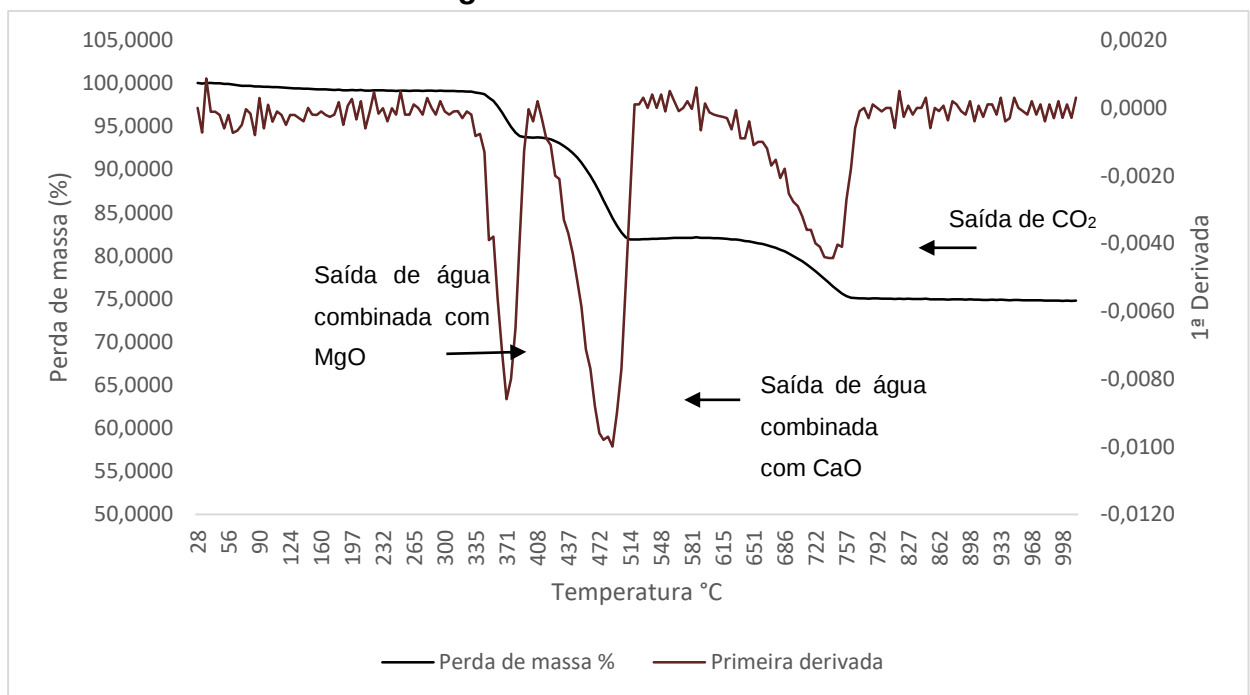


Figura 9. Curva de TG AM 1



A partir dos dados das curvas de TG foi possível retirar informações sobre as composições das amostras analisadas, os dados estão indicados na tabela 9.

Tabela 9. Resultados a partir das curvas de TG

Parâmetro	AM 1	AM 2 SF
PPC* (%)	24,95 ± 0,05	25,08 ± 0,01
Água combinada com MgO (%)	5,35 ± 0,05	6,08 ± 0,05
Água combinada com CaO (%)	11,73 ± 0,11	11,69 ± 0,15
Ca(OH) ₂ (%)	48,24 ± 0,43	48,05 ± 0,62
Mg(OH) ₂ (%)	17,24 ± 0,17	19,59 ± 0,15
CO ₂ (%)	6,95 ± 0,05	7,09 ± 0,02

*PPC: Perda por calcinação

Os resultados de TGA indicam que as amostras apresentam composições semelhantes, com poucas variações após a moagem. Observa-se um aumento no teor de água combinada ao MgO e de Mg(OH)₂ na amostra AM 2 SF, o que sugere maior hidratação da fase magnésiana devido ao aumento de área superficial proporcionado pela moagem. Já os teores de Ca(OH)₂ e CO₂ permanecem praticamente constantes, indicando que a moagem não alterou de forma significativa a hidratação da fase cálcica nem promoveu carbonatação adicional. Dessa forma, a principal diferença está relacionada ao comportamento da fase MgO/Mg(OH)₂, que apresentou maior reatividade na amostra superfina.

4.4 Aplicação do leite de cal no caldo

A etapa de ajuste de pH do caldo clarificado foi realizada com o objetivo de avaliar o consumo de leite de cal necessário para atingir o intervalo operacional recomendado de 6,8 a 7,2. Para isso, foram comparadas as amostras AM 1 e AM 2 SF, mantendo-se as mesmas condições de preparo, temperatura e agitação.

Tabela 10. Resultado do ajuste do pH e consumo de cal após aplicação

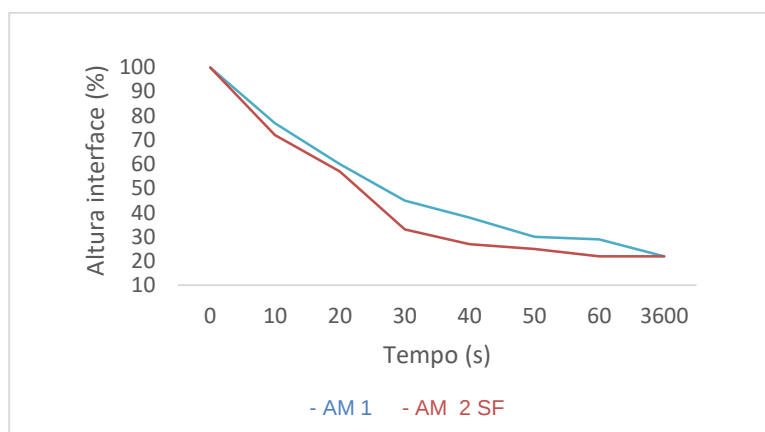
AMOSTRA	pH inicial	pH ajustado	pH final	Massa de cal consumida/ L de caldo de cana (g/L)
AM 1	5,38	6,95	7,12	0,37
	5,34	7,02	7,04	0,37
	5,34	7,02	7,20	0,38
AM 2 SF	5,37	7,00	7,12	0,35
	5,35	6,94	6,98	0,37
	5,36	7,16	7,20	0,38

Embora a amostra superfina apresente ligeiro aumento no teor de $\text{Mg}(\text{OH})_2$, o consumo de cal para ajuste de pH permaneceu semelhante entre as amostras, com consumo médio de 0,37 g de cal por litro de caldo para ambas as amostras. Isso pode ser explicado devido à solubilidade das bases presentes, pois compostos com maior solubilidade possuem maior liberação imediata de íons OH^- . O $\text{Mg}(\text{OH})_2$, sendo menos solúvel e com cinética de hidratação mais lenta, contribui de forma limitada à alcalinidade, atuando mais como reserva de reatividade a longo prazo como menciona Boynton (1980).

4.4.1 Teste de decantação

A figura 10 apresenta a evolução da altura da interface sólido/líquido durante o processo de sedimentação para as amostras AM 1 e AM 2 SF.

Figura 10. Gráfico de comparação da velocidade de sedimentação do caldo caleado com as amostras AM 1 e AM 2 na concentração de 10% m/m



Observa-se que, embora ambas as amostras iniciem o processo com comportamento semelhante, a AM TIPO 2 SF apresenta uma queda mais rápida da interface a partir de aproximadamente 20–30 s, indicando maior velocidade de sedimentação. Esse resultado evidencia que a moagem superfina favorece a formação de flocos mais densos e coesos, resultando em uma decantação mais eficiente. Já a AM TIPO 1 apresenta cinética de sedimentação mais lenta, sugere-se que devido a reatividade mais lenta das partículas maiores na etapa de coagulação o observasse o comportamento indicado, prejudicando a etapa de floculação e coagulação.

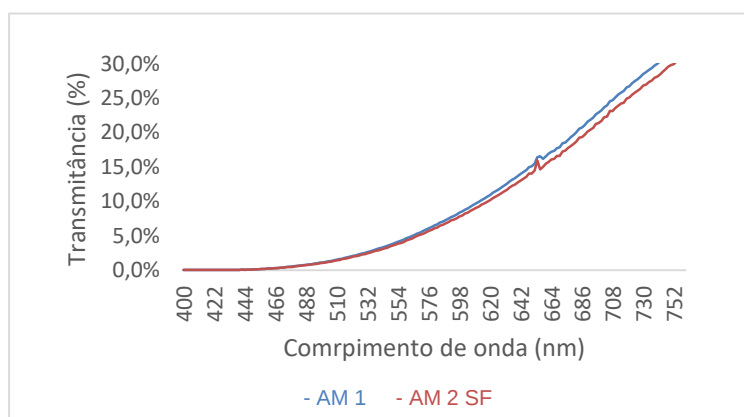
Ao final do tempo de análise, ambas atingem alturas finais semelhantes, sugerindo que a quantidade total de material sedimentado é comparável, porém o tempo para clarificação é menor quando se utiliza a amostra superfina.

Contudo, é importante destacar que não foi possível atingir plenamente a faixa de temperatura recomendada (105–110 °C) após a etapa de caleagem, pois, o caldo iniciava fervura em temperatura próxima a 90°C, o que impossibilitou atingir a temperatura estabelecida. O aquecimento adequado auxilia na degradação de compostos coloridos e na eliminação de oxigênio dissolvido, contribuindo para a estabilidade e coalescência dos flocos. Assim, a limitação térmica pode ter prejudicado parcialmente o desempenho da clarificação, o que explica a presença de sólidos em suspensão que não decantaram completamente, especialmente nos tempos finais de sedimentação.

4.4.2 Medição da transmitância do caldo

A transmitância foi medida no sobrenadante após 1 hora de decantação, tempo correspondente ao processo industrial. A faixa de 400–750 nm foi utilizada por englobar a absorção de compostos responsáveis pela cor do caldo, como fenóis, taninos e produtos de escurecimento. Observa-se que as amostras AM 1 e AM 2 SF apresentam curvas de transmitância semelhantes ao longo do espectro, indicando desempenho comparável quanto à remoção de compostos cromóforos.

Figura 11. Gráfico da comparação da transmitância do caldo caleado com as amostras AM 1 e AM 2 SF



No entanto, devido às limitações de aquecimento durante a etapa de caleagem, a temperatura não atingiu 105–110 °C, o que restringe a degradação térmica de pigmentos e a remoção de oxigênio dissolvido. Como resultado, foram mantidos sólidos em suspensão no sobrenadante como pode verificar a Figura 12, os quais não foram removidos por filtração antes das leituras, podendo reduzir a transmitância por dispersão e não necessariamente por maior concentração de compostos coloridos.

Assim, os valores obtidos não devem ser interpretados como medida absoluta de claridade, mas como parâmetro comparativo entre as duas granulometrias. Mesmo com essa limitação, verifica-se que a menor granulometria (AM 2 SF) não prejudicou a transparência final do caldo, corroborando os resultados anteriores de melhor formação e sedimentação dos flocos sem alteração significativa do desempenho óptico.

Figura 12. Caldo de cana antes e após o tratamento



Autor: Próprio

4.4.3 Determinação de cálcio e magnésio residual

A Tabela 11 apresenta as concentrações residuais de cálcio e magnésio no caldo após o tratamento com diferentes tipos e granulometrias de cal dolomítica. Os dados foram obtidos para avaliar a influência do tipo de amostra e da redução granulométrica na liberação de íons metálicos, em correlação com os resultados obtidos por TGA, permitindo uma análise da reatividade química do material no processo de clarificação do caldo.

Tabela 11. Resultados de cálcio e magnésio residual no caldo caleado

AMOSTRA	Concentração de cálcio mg/L	Concentração de magnésio mg/L
Caldo sem tratamento	67	123
AM 1	95	129
	107	128
AM 2 SF	102	141
	101	150

A análise dos resultados evidencia que a concentração de cálcio se mantém relativamente constante, variando entre 95 e 107 mg/L para AM 1 e entre 101 e 102 mg/L para AM 2 SF, independentemente da granulometria, indicando que a solubilização do CaO no caldo ocorre de forma eficiente e estável. Em contraste, o magnésio apresenta aumento mais significativo, atingindo valores entre 141 e 150 mg/L para a AM 2 SF, em concordância com os resultados do TGA que indicam maior formação de hidróxido de magnésio ($Mg(OH)_2$) nas amostras mais finas. Esses dados sugerem que a redução granulométrica aumenta a reatividade do magnésio no sistema, enquanto o cálcio permanece estável, evidenciando a importância do controle da granulometria para otimizar a eficiência do tratamento do caldo. O laudo de análise pode ser consultado no anexo 2.

5 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram que a redução granulométrica da cal dolomítica influencia diretamente sua reatividade e o comportamento de sedimentação no processo de clarificação do caldo de cana. Embora a composição química das amostras tenha permanecido similar, a AM 2 SF apresentou maior teor de água combinada associada aos hidróxidos, indicando maior grau de hidratação, efeito atribuído ao aumento da área superficial promovido pela moagem.

A análise de cálcio e magnésio residual no caldo reforça essas observações, a concentração de cálcio manteve-se relativamente estável entre as amostras, enquanto o magnésio apresentou aumento significativo nas amostras superfinas, em concordância com os resultados de termogravimetria que indicam maior formação de Mg(OH)_2 . Esse comportamento evidencia que a redução granulométrica potencializa a reatividade do magnésio, ao passo que o cálcio permanece estável, refletindo a eficiência da liberação de Ca(OH)_2 independentemente da granulometria.

A comparação das propriedades físicas e químicas das amostras em diferentes concentrações revelou que a amostra a 10% m/m não atingiu o mesmo perfil granulométrico e grau de reatividade observado a 30% m/v. Esse efeito pode ser atribuído à maior temperatura máxima atingida devido a maior concentração de sólidos, promovendo assim uma redução mais acentuada no leite de maior concentração. Esses resultados sugerem que estudos futuros devem ser realizados considerando o preparo do leite de cal na concentração de 30% m/v e posteriormente, diluído conforme as condições da usina, para verificar se o desempenho na clarificação do caldo é otimizado. Além disso, com a redução no tamanho das partículas e do consequente aumento da reatividade, recomenda-se também a realização de um estudo cinético para monitorar a concentração de hidróxidos ao longo do período de 24 horas de hidratação, a fim de avaliar a necessidade de reduzir esse intervalo.

Verificou-se ainda que a cal superfina acelerou a formação dos flocos, favorecendo a geração de um lodo mais denso e aumentando a velocidade de sedimentação, conforme observado nos ensaios de decantação. Entretanto, o consumo de cal necessário para o ajuste de pH permaneceu praticamente constante entre as amostras, podendo ser explicado, segundo Boynton (1980), pela baixa solubilidade do $\text{Mg}(\text{OH})_2$ no meio reacional. A avaliação da transmitância indicou comportamento óptico semelhante entre os caldos tratados, embora os resultados possam ter sido influenciados pelas limitações de temperatura durante a caleagem, que restringiram a degradação de compostos coloridos e favoreceram a presença de sólidos em suspensão, sem comprometer a comparação entre as amostras.

Dessa forma, conclui-se que a moagem superfina da cal dolomítica mostrou-se eficiente na etapa de clarificação, principalmente pela otimização da floculação e da sedimentação, sem aumentar o consumo de cal, evidenciando seu potencial como alternativa vantajosa para aplicação industrial.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6473:2003 Cal Virgem e cal hidratada: Análise. Rio de Janeiro. ABNT, 2003.

BARROS, Filipe Brito Marinho de. **Efeito do tamanho de partícula na decomposição térmica de calcário metamórfico e sedimentar.** 2016. 34. Monografia (Graduação Engenharia de Minas), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.

BOYNTON, Robert S. **Chemistry and Technology of Lime and Limestone.** 2ed. Canadá: John Wile & Sons, INC, February 1980. 575.

CAMPOS, Antônio; LUZ, Adão; BASTOS, Flavia; NOGUEIRA, Igor. Calcinação. In Tratamento de minérios Capítulo 16. 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap.16, p.727-752.

CÉSAR, M. A. A.; CARUSO, J. G. B.. **Observações sobre o uso da cal com elevado teor de magnésio na indústria açucareira.** Revista STAB – Sociedade dos técnicos açucareiros e alcooleiros do Brasil, vol. 21, nº 3. 38-40. 2003.

CETEM/MCT, 2009. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/500>. Acesso: 25/09/2025.

CHIKUKU, R. S.; GOVENDER, I.; MAINZA, A. N.; MANGESANA, N.; NARASHIMA, M. The effect of particle sizes and solids concentration on the rheology of silica sand based suspensions. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy.** Marshalltown, South Africa. v. 108. 237-243. Apr. 2008. Disponível em: <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:168944>. Acesso: 19 out. 2025.

CINCOTTO, Maria Alba. **Influência da matéria-prima e dos fornos de calcinação nas características da cal virgem volume 1.** Maio, 1987. 164. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP. 06/02/2024

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Safra 2024/25 de cana-de-açúcar encerra com produção estimada em 676,96 milhões de toneladas.** Disponível em: <<https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/safra-2024-25-de-cana-de-acucar-encerra-com-producao-estimada-em-676-96-milhoes-de-toneladas>> Acesso em: 27 agosto 2025.

COSTA, Gustavo Henrique Gravatin; FREITA, Cristhyane Millena; MENDES, Franciele Quintino; MUTTON, Márcia Justino Rossini. Extrato de sementes de moringa como floculante de caldo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropec. Bras.** Brasília, v. 51, n. 10, p. 1794-1798, out. 2016. Disponível em:< <https://www.scielo.br/j/pab/a/3nPrVpS8DWDPX44LJ7n6BTG/#:~:text=H%C3%A1%20indica%C3%A7%C3%A3o%20de%20que%20a,compostos%20fen%C3%B3li>

cos%20do%20caldo%20extra%C3%ADdo.>. Acesso em: 28 de abr. 2025.

FLOCK, Carolina. **Clarificação e Pré-concentração de Caldo de Cana através de membranas**. 2016. 136. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

FONSECA, Jean Lacerda. **Influência da granulometria das partículas na flotabilidade do quartzo**. 2022. 45. Monografia (Graduação Engenharia de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. Disponível em: < <https://demin.ufmg.br/downloadtcc.php?f=162> > Acesso: 2 out. 2025

HAMERSKI, Fabiane. **Estudo de Variáveis no Processo de Carbonatação do Caldo de Cana-de-açúcar**. Agosto, 2009. 140. Dissertação (Mestrado Tecnologia de Alimentos), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. 28/08/2009.

HERZOG. Manual Vibratory Disc Mill HSM. Novembro, 2021. Disponível em: < https://www.herzog-maschinenfabrik.de/fileadmin/Produkte/HSM/Produktbrosch%C3%BCre_en_fr_sp/HERZOG_HSM_en_web.pdf > Acesso: 2 out. 2025

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção Cana-de-açúcar**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cana-de-acucar/br>> Acesso em: 27 ago. 2025.

KALINKIN, A. M; KALINKINA, E. V.; ZALKIND, O. A.; MAKAROVA, T. I.. **Chemical Interaction of Calcium Oxide and Calcium Hydroxide with CO₂ during Mechanical Activation**. Revista Inorganic Materials, Vol. 41. No. 10, 2005, p. 1073-1079.

LIMA, Camila Francisconi. **Utilização de polímeros no setor sucroenergético**. 2017. 37. Monografia (Pós graduação em Gestão de Tecnologia Industrial Sucroenergética), Universidade Federal de São Carlos, Sertãozinho, SP. Disponível em: <<https://www.mta.ufscar.br/arquivos/publicacoes/sertaozinho-v>> Acesso: 2 out. 2025.

LOPES, Cláudio Hartkopf. **Tecnologia de produção de açúcar de cana**. 2011. Coleção UAB-UFSCar, São Carlos, SP.183.

LUNA, Higor Mendes de; PEREIRA, Fernando Gabriel Eguía. **Sistemas e operações do processo de produção de açúcar VHP**. Revista eSALENG – Revista Eletrônica das Engenharias do UniSALESIANO. vol. 10. 181. 2022. Disponível em: < https://unisalesiano.com.br/aracatuba/wp-content/uploads/2024/03/Volume10_2022.pdf > . Acesso: 30 set. 2025

NGUYEN, Van hung; NGUYEN, Thi Hoai Duc; VU, Thu Trang; LUONG, Hong Nga; ARCHARD, Dominique Anne; FILLAUDEAU, Luc; NGUYEN, Tien Cuong. **Impact of Particle Size on the Rheological Properties and Amylolysis Kinetics of Ungelatinized Cassava Flour Suspensions, Processes**. MDPI. 2021. 16. June, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2227-9717/9/6/989?utm_source=chatgpt.com. Acesso: 19 out. 2025

NIQUES, Georg's. **Efeito do tempo de maturação na microestrutura de uma cal virgem dolomítica**. Março, 2003. 110. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

PARREIRA, Priciane Martins. **Projeto e operação de hidratadores industriais de cal virgem**. Dezembro 2010. 141. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. 20/12/2010.

PEREIRA, Luana dos Santos; FERREIRA, Gilson Ezequiel. A indústria da cal no Brasil. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 17., Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro:

PINTO, Davi Souza. **Estudo sobre o processo produtivo de cal**. Março 2023. 57. Monografia (Engenharia Química) -, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 15/03/2023. Disponível em: <https://sip.prg.ufla.br/publico/trabalhos_conclusao_curso/acessar_tcc_por_curso/engenharia_quimica/index.php?dados=20222201620950>. Acesso: 20 set. 2025.

SANTANA, Geovana Lira. **Estudo Comparativo através da análise de variância para determinação da distribuição granulométrica pelas técnicas de sedimentação e difração a laser**. Novembro, 2017. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB. 01/12/2017.

SILVA, Alaine Cardoso. **Estudo e otimização da reação de hidratação do hidróxido de cálcio**. Março, 2007. 111. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) -, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. 23/03/2007.

SILVA, Antonio Santos. Cal Dolomítica: o passado e o presente. **Revista Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 18, n. 4, p. 63-74, out./dez. 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ac/a/hB5S9SxH46rpQxJX4MwWJmG/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 28 de abr 2025.

SILVA, Edivaldo Alexandre Bezerra da. **Influência da concentração de ácido fosfórico na otimização da clarificação do caldo de cana**. Abril, 2025. 42. Monografia (Graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB. 29/04/2025.

SILVA, José Otávio. Perfil da cal. Ministério de minas e energia. **Secretaria de Geologia, mineração e transformação mineral**. Brasília, 2009. Disponível em: http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/449811/P46_RT72_Perfil_do_Cal.pdf/683f97ebfaa3-0c8f-7473-1dbd9f818157?version=1.0. Acesso: 20 set. 2025

SOARES, Bruno Daniel. **Estudo da Produção de óxido de cálcio por calcinação do calcário: caracterização dos sólidos, decomposição térmica e otimização paramétrica**. Fevereiro, 2007. 121. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. 28/02/2007.

SOCIEDADE AMERICANA PARA TESTES E MATERIAIS. ASTM C110-09 Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone. Estados Unidos. ASTM, 2009.

UNICA. Açúcar, Brasil: O Maior produtor mundial de açúcar. Disponível em: <<https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/acucar/>>. Acesso em: 27, out. 2025

VECCHIATTINI, Rita. **The use of dolomitic lime in historical buildings: History, technology and science.** January, 2003. Congress, Proceedings of the First International Congress on Construction History, Madrid.

ANEXO 1 - LAUDO DE ANÁLISE DE CÁLCIO E MAGNÉSIO RESIDUAL

	AL-SUKKAR BIOTECNOLOGIA INDUSTRIAL Rua Gildo Ignácio nº 481 – Nova Ribeirânia Ribeirão Preto/SP – CEP 14.096-670 – tel: (16) 9 9725 3093 e-mail: vendas2@alsukkar.com.br	
---	--	---

Certificado de análises	Nº 504/25	Data da emissão: 27/08/2025
--------------------------------	------------------	------------------------------------

1. Dados do solicitante

Tipo da análise:	Análise físico-química de cálcio e magnésio em caldo de cana		
Nº Orçamento:	4506	Nº Amostra:	FER 504 - 508

Método requerido:	Análise dos metais realizada por espectrofotometria de absorção atômica com chama, conforme método analítico de acordo com norma APHA, WWA, WPCF – Standard methods for the examination of water and wastewater 23th (2017).
--------------------------	--

1. Identificação da amostra			
Amostra	Tipo de Material	Data da Coleta	Lacre
FER 504	Caldo de cana	14/08	-
FER 505	Caldo de cana AM tipo 1-1	14/08	
FER 506	Caldo de cana AM tipo 1-2	14/08	
FER 507	Caldo de cana AM tipo 1-1 SF	14/08	
FER 508	Caldo de cana AM tipo 1-2 SF	14/08	

O Laboratório não é responsável pela amostragem. Os resultados se aplicam à amostra conforme recebida.

Data recebimento amostra:	14/08	Data início ensaio:	18/08
----------------------------------	-------	----------------------------	-------

2. Resultados de análise de Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg)						
Parâmetro	Unidade	Método	Resultado Ca	Resultado Mg	VMP	LDM
FER 504	mg/L	SM3120 B	67	123	NC	0,01
FER 505	mg/L	SM3120 B	95	129	NC	0,01
FER 506	mg/L	SM3120 B	107	128	NC	0,01
FER 507	mg/L	SM3120 B	102	141	NC	0,01
FER 508	mg/L	SM3120 B	101	150	NC	0,01

VMP – Valor Máximo Permissível

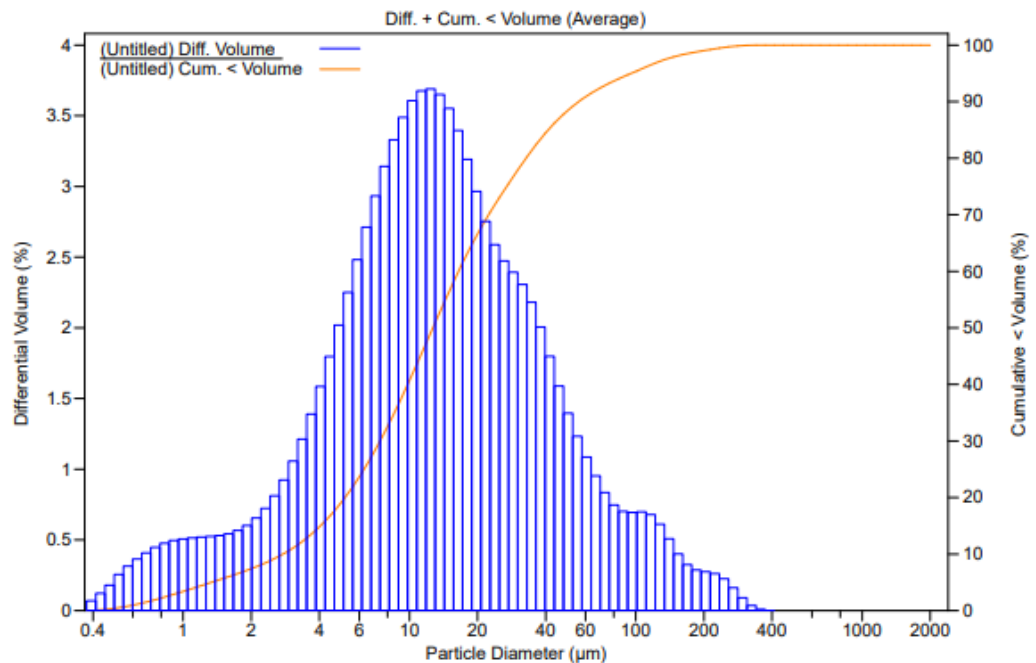
LDM - limite de detecção do método

NC - não consta

<i>O laboratório de química da Al Sukkar se encontra credenciado pelo CRQ-IV região sob o nº 27356-F</i>	<i>Dra. Eloiza Mochetti Kronka</i> Resp. técnica CRQ nº 04236030 
--	---

ANEXO 2 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DA ANÁLISE PSD PARA AMOSTRA AM 1 10% M/M APÓS PERÍODO DE REATIVIDADE

Operator: Gábria
Optical model: Fraunhofer.rf780z
LS 13 320 SW Universal Liquid Module
Fluid: ETANOL
Average of 6 files
AM TIPO 1 _01_53.\$ls
AM TIPO 1 _01_54.\$ls
AM TIPO 1 _01_55.\$ls
AM TIPO 1 _01_56.\$ls
AM TIPO 1 _01_57.\$ls
AM TIPO 1 _01_58.\$ls



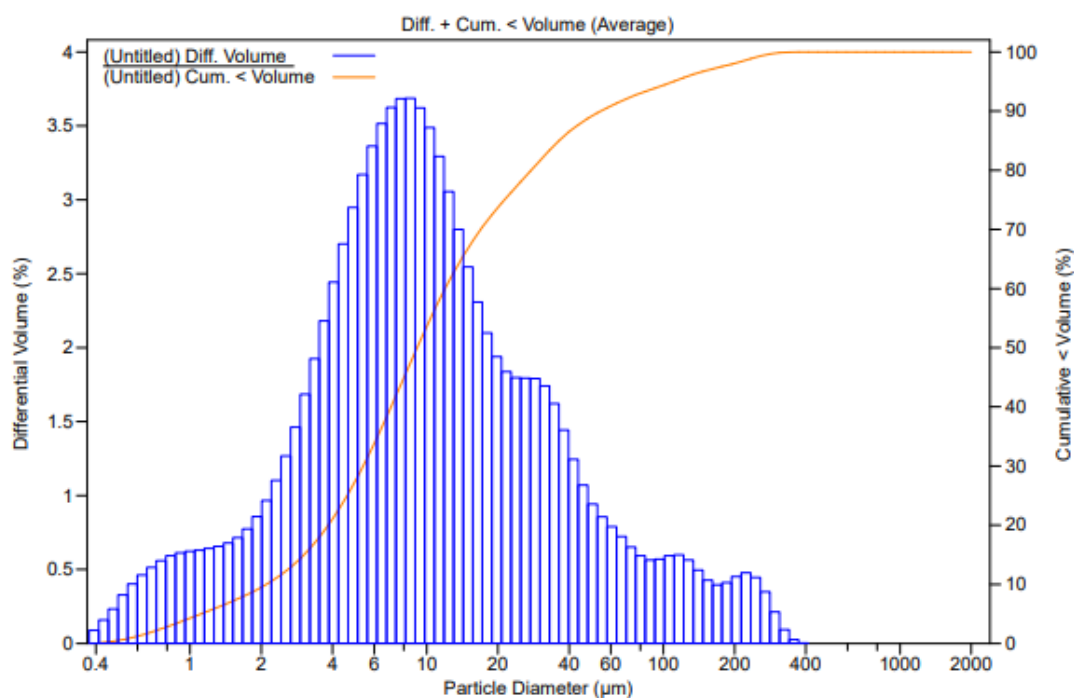
Volume Statistics (Arithmetic)

Calculations from 0.375 µm to 2000 µm

Volume:	100%				
Mean:	24.73 µm	S.D.:	36.32 µm		
Median:	12.70 µm				
D(3,2):	5.822 µm				
Mean/Median ratio:	1.948				
Specific Surf. Area:	10306 cm ² /mL				
<10%	<25%	<50%	<75%	<90%	<98%
2.763 µm	6.302 µm	12.70 µm	26.89 µm	56.05 µm	149.5 µm

ANEXO 3 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DA ANÁLISE PSD PARA AMOSTRA AM 1 10% M/M APÓS PERÍODO DE 24 HORAS DE AGITAÇÃO

Operator: Gábia
Optical model: Fraunhofer.rf780z
LS 13 320 SW Universal Liquid Module
Fluid: ETANOL
Average of 6 files
AM TIPO 1 _01_41.\$ls
AM TIPO 1 _01_42.\$ls
AM TIPO 1 _01_43.\$ls
AM TIPO 1 _01_44.\$ls
AM TIPO 1 _01_45.\$ls
AM TIPO 1 _01_46.\$ls



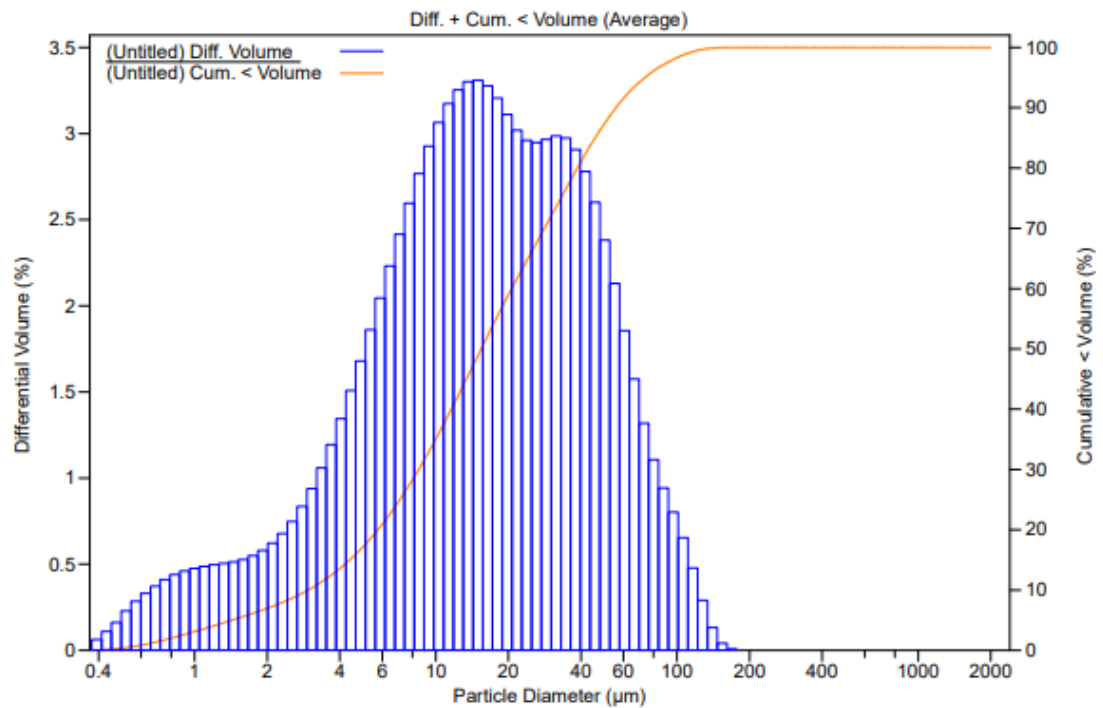
Volume Statistics (Arithmetic)

Calculations from 0.375 µm to 2000 µm

Volume:	100%				
Mean:	23.86 µm	S.D.:	43.39 µm		
Median:	9.122 µm				
D(3,2):	4.696 µm				
Mean/Median ratio:	2.616				
Specific Surf. Area:	12776 cm ² /mL				
<10%	<25%	<50%	<75%	<90%	<98%
2.106 µm	4.614 µm	9.122 µm	21.35 µm	54.43 µm	196.9 µm

ANEXO 4 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DA ANÁLISE PSD PARA AMOSTRA AM 2 SF 10% M/M APÓS REATIVIDADE

Operator: Gábia
 Optical model: Fraunhofer.rf780z
 LS 13 320 SW Universal Liquid Module
 Fluid: ETANOL
 Average of 6 files
 AM TIPO 1 _01_05.\$ls
 AM TIPO 1 _01_07.\$ls
 AM TIPO 1 _01_09.\$ls
 AM TIPO 1 _01_10.\$ls
 AM TIPO 1 _01_06.\$ls
 AM TIPO 1 _01_08.\$ls



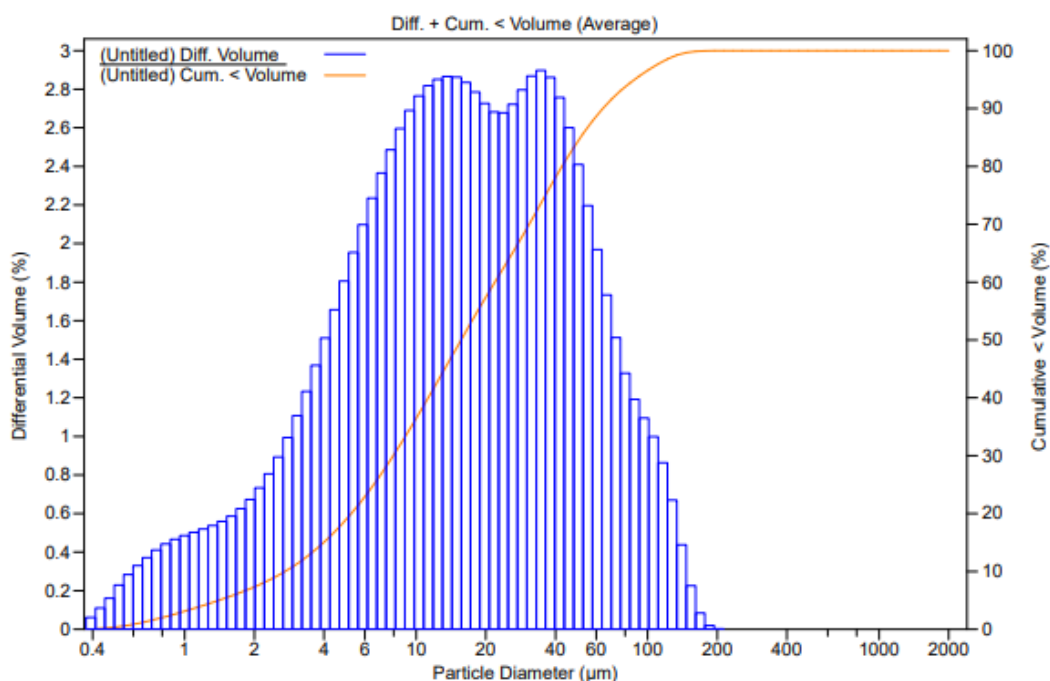
Volume Statistics (Arithmetic)

Calculations from 0.375 µm to 2000 µm

Volume:	100%	S.D.:	23.76 µm
Mean:	23.74 µm		
Median:	15.42 µm		
D(3,2):	6.346 µm		
Mean/Median ratio:	1.539		
Specific Surf. Area:	9454 cm ² /mL		
<10%	<25%	<50%	<75%
2.958 µm	7.106 µm	15.42 µm	32.99 µm
			<90%
			55.85 µm
			<98%
			96.65 µm

ANEXO 5 – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DA ANÁLISE PSD PARA AMOSTRA AM 2 SF 10% M/M APÓS PERÍODO DE 24H DE AGITAÇÃO

Operator: Gábia
Optical model: Fraunhofer.rf780z
LS 13 320 SW Universal Liquid Module
Fluid: ETANOL
Average of 6 files
AM TIPO 1 _01_17.\$ls
AM TIPO 1 _01_19.\$ls
AM TIPO 1 _01_20.\$ls
AM TIPO 1 _01_21.\$ls
AM TIPO 1 _01_18.\$ls
AM TIPO 1 _01_22.\$ls



Volume Statistics (Arithmetic)

Calculations from 0.375 µm to 2000 µm

Volume:	100%	S.D.:	28.24 µm
Mean:	26.17 µm		
Median:	15.63 µm		
D(3,2):	6.179 µm		
Mean/Median ratio:	1.674		
Specific Surf. Area:	9710 cm ² /mL		
<10%	<25%	<50%	<75%
2.716 µm	6.559 µm	15.63 µm	36.19 µm
			<90%
			64.00 µm
			<98%
			114.8 µm