

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**STHÉFANY ANGÉLICA SILVA DE VARGAS**

**CARACTERIZAÇÃO E PROCESSO PRODUTIVO DA CAL: ESTUDO DE CASO  
DO BENEFICIAMENTO DO CALCÁRIO DE UMA COMPANHIA DE MINERAÇÃO  
LOCALIZADA NA REGIÃO DA CAMPANHA DO RIO GRANDE DO SUL**

**Caçapava do Sul**

**2024**

**STHÉFANY ANGÉLICA SILVA DE VARGAS**

**CARACTERIZAÇÃO E PROCESSO PRODUTIVO DA CAL: ESTUDO DE CASO  
DO BENEFICIAMENTO DO CALCÁRIO DE UMA COMPANHIA DE MINERAÇÃO  
LOCALIZADA NA REGIÃO DA CAMPANHA DO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Programa Pós-Graduação Strictu Sensu em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa – Campus Caçapava do Sul, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mineral.

Orientadora: Maria Alejandra Liendo

Coorientadora: Caroline Wagner

**Caçapava do Sul**

**2024**

V582c Vargas, Sthéfany Angélica Silva de  
Caracterização e processo produtivo da cal: estudo de caso  
do beneficiamento do calcário de uma companhia de mineração  
localizada na região da campanha do rio grande do sul /  
Sthéfany Angélica Silva de Vargas.

70 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,  
MESTRADO EM ENGENHARIA MINERAL, 2024.

"Orientação: Maria Alejandra Liendo".

1. Caracterização. 2. cal virgem. 3. cal hidratada. I.  
Título.

**STHÉFANY ANGÉLICA SILVA DE VARGAS**

**CARACTERIZAÇÃO E PROCESSO PRODUTIVO DA CAL: ESTUDO DE CASO DO BENEFICIAMENTO DO CALCÁRIO DE UMA COMPANHIA DE MINERAÇÃO LOCALIZADA NA REGIÃO DA CAMPANHA DO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 16 de fevereiro de 2024.

Banca examinadora:

---

Profa. Dra. Maria Alejandra Liendo  
Orientador  
(UNIPAMPA)

---

Profa. Dra. Caroline Wagner  
(UNIPAMPA)

---

Prof. Dr. Wladimir Hernandez Flores  
(UNIPAMPA)

---

Rodrigo Saraiva Dantas  
(Eletrobras)



Assinado eletronicamente por **WLADIMIR HERNANDEZ FLORES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/02/2024, às 11:33, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Rodrigo Saraiva Dantas, Usuário Externo**, em 21/02/2024, às 13:43, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARIA ALEJANDRA LIENDO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/02/2024, às 13:55, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CAROLINE WAGNER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/02/2024, às 13:30, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1369969** e o código CRC **8F8F518E**.

## RESUMO

A cal é um produto tradicionalmente utilizado em variados processos. Podem ser encontradas diferentes tipos de cales no mercado e as variações ocorrem devido ao tipo de rocha que origina o produto e ao processo de produção, originando cales com características químicas e físicas distintas. O processo de produção de cal em uma empresa mineradora envolve a extração de calcário das jazidas, britagem e moagem das rochas, calcinação e classificação. Os fatores que influenciam a qualidade da cal virgem incluem o tipo de matéria-prima, o processo de calcinação, a granulometria, o controle de impurezas, armazenamento e a atenção ao meio ambiente, duas variáveis importantes para a eficiência e qualidade da produção de cal virgem. Para a produção de cal hidráulica, após a calcinação ocorre o processo de hidratação, seguido da mistura e classificação, para posterior armazenagem. Este trabalho teve por objetivo, estudar o processo de produção da cal virgem e hidratada, e caracterizar as amostras destas, provenientes de uma indústria da região sul do estado do RS, a fim de identificar aspectos que possam ser otimizados. Para esse fim, foram obtidos os dados de TGA para o carbonato e cal hidratada, ambos mostram em qual temperatura ocorreu a maior perda de massa no processo. Também foi realizada a caracterização da cal virgem através de sua análise granulométrica, obtendo-se o diâmetro médio em torno de 80 $\mu$ m. Ainda foram realizados ensaios de fluorescência e difração de raios-X, os resultados da fluorescência mostram que para a cal hidratada foi encontrado uma porcentagem de Ca 67,70% e Mg 25,36%, na cal virgem uma porcentagem de Ca 67,20% e Mg 26,78%. Nos resultados de DRX foi encontrado compostos de Ca e Mg em ambas as amostras, além de CaO na cal virgem e Ca (OH)<sub>2</sub> na cal hidratada. Desta forma destaca-se que algumas melhorias podem ser adotadas para que o processo tenha um melhor desempenho, uma delas seria na transformação do carbonato de cálcio em óxido, além disso, sugere-se à empresa adotar um controle da temperatura do forno próximo a temperatura de calcinação;

Palavras-Chave: Caracterização, cal virgem, cal hidratada.

## ABSTRACT

Lime is a product traditionally used in various processes. Different types of lime can be found in the market, and the variations occur due to the type of rock that originates the product and the production process, resulting in limes with distinct chemical and physical characteristics. The lime production process in a mining company involves the extraction of limestone from deposits, crushing and grinding of rocks, calcination, and classification. Factors influencing the quality of quicklime include the type of raw material, the calcination process, particle size distribution, impurity control, storage, and attention to environmental concerns. Studies emphasize the importance of these factors for the efficiency and quality of quicklime production, crucial variables. For the production of hydraulic lime, after calcination, the hydration process occurs, followed by mixing and classification for subsequent storage. Therefore, this study aimed to investigate the production process of quicklime and hydrated lime and characterize samples from an industry in the southern region of Rio Grande do Sul state to identify aspects that could be optimized. For this purpose, TGA data were obtained for Carbonate and hydrated lime, both showing the temperature at which the greatest mass loss occurred in the process. Quicklime was characterized through particle size analysis, obtaining an average diameter of around 80 $\mu$ m, fluorescence tests, and X-ray diffraction. In hydrated lime, a percentage of Ca 67.70% and Mg 25.36% was found, while in quicklime, a percentage of Ca 67.20% and Mg 26.78% was found. In XRD, compounds of Ca and Mg were found in both samples, in addition to CaO in quicklime and Ca(OH)<sub>2</sub> in hydrated lime. In this way, it is highlighted that some improvements can be adopted so that the process has better performance, one of them would be the transformation of calcium carbonate into oxide, in addition, it is suggested that the company adopt a control of the oven temperature close to the temperature calcination

Keywords: Characterization, quicklime, hydrated lime.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de imagem representando um forno rotativo.....	23
Figura 2 – Exemplo de figura representando um forno fluidizado. ....	24
Figura 3 – Exemplo de imagem representando um forno vertical. ....	25
Figura 4 – Exemplo de figura representando um forno vertical de alvenaria. ....	26
Figura 5 – Exemplo de figura representando um hidratador de leito fluidizado.....	29
Figura 6 – Exemplo de figura representando um hidratador de tambor. ....	29
Figura 7 – Gráfico Difratoograma da Cal Virgem e Cal hidratada. ....	33
Figura 8 – Gráfico de perda de massa x temperatura. TGA plotado com os dados de uma amostra de calcário. ....	37
Figura 9 – Gráfico Perda de massa x temperatura. TGA plotado com os dados de uma amostra de cal hidratada. ....	38
Figura 10 – Fluxograma do processo de produção da cal virgem e hidratada. ....	39
Figura 11 – Esquema da sequência metodológica.....	48
Figura 12 – Foto da Amostra de Calcário.....	49
Figura 13 – Esquema do processo de produção da cal hidratada. ....	52
Figura 14 – Esquema do processo de produção da cal virgem.....	52
Figura 15 – Distribuição granulométrica da amostra de cal virgem.....	54
Figura 16 – Gráfico TGA em porcentagem de perda de massa para o carbonato. ...	55
Figura 17 – Gráfico TGA em porcentagem de perda de massa para cal hidratada. .	56
Figura 18 – Resultado das análises de difração raios-X. ....	59



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Resultado das análises de fluorescência raios-X em amostras de cal virgem e hidratada .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabela 2 – Resultado das análises de difração de raios-X .....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

**ABNT:** Associação Brasileira de Normas Técnicas

**Al:** Alumínio

**C:** Carbono

**Ca:** Cálcio

**CaCO<sub>3</sub>:** Carbonato de cálcio

**CaO:** Óxido de Cálcio.

**Ca(OH)<sub>2</sub>:** Hidróxido de cálcio

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono

**DRX:** Difração de raios-X

**FRX:** Fluorescência de raios-x

**MgCO<sub>3</sub>:** Carbonato de magnésio

**MgO:** Óxido de magnésio

**Mg(OH)<sub>2</sub>:** Hidróxido de magnésio

**NBR:** Norma Brasileira

**O:** Oxigênio

**Si:** Silício

**TGA:** Análise Termogravimétrica

## SUMÁRIO

RESUMO.....	5
1 INTRODUÇÃO .....	12
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos Específicos .....	15
3 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA .....	16
3.1 Produtos do Calcário .....	16
3.1.1 Óxido de cálcio ou cal virgem.....	17
3.1.2 Cal hidratada.....	19
3.2 Tecnologias e operações unitárias da cal virgem e hidratada.....	20
3.2.1 Fornos .....	21
3.2.2 Hidratadores .....	27
3.3 Técnicas de caracterização de produtos e reagentes do processo da cal virgem e hidratada .....	30
3.3.1 DRX.....	31
3.3.2 Fluorescência de raios-X .....	33
3.3.3 Massa específica .....	34
3.3.4 Análise termogravimétrica .....	35
3.4 Processo de Produção da Cal virgem e hidratada .....	38
3.5 Fatores do processo de produção da cal virgem e hidratada que influenciam na característica do produto .....	40
3.5.1 Produção de cal virgem .....	40
3.5.2 Produção de cal hidratada.....	47
4 METODOLOGIA .....	48
4.1 Representação esquemática da sequência metodológica. ....	48

<b>4.2 Caracterização de matérias primas e produtos: calcário, cal virgem e cal hidratada .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2.1 Técnicas de Análises .....</b>	<b>50</b>
<b>4.3 Caracterização da empresa estudada e do seu processo produtivo: tecnologias utilizadas e as condições de operação .....</b>	<b>51</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>54</b>
<b>5.1 Análise dos dados de Caracterização .....</b>	<b>54</b>
<b>5.2. Análise dos dados de Análise Termogravimétrica.....</b>	<b>55</b>
<b>5.3 Análise dos dados de fluorescência de raios-X .....</b>	<b>57</b>
<b>5.4 Análise dos dados de difração de raios-X .....</b>	<b>58</b>
<b>5.5 Sugestões de melhorias. ....</b>	<b>61</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As indústrias produtoras de cal registraram um crescimento significativo no ano de 2021. O aumento da demanda das indústrias siderúrgicas e das ligadas à produção de celulose industrial que precisavam da cal para se manter ativas, fez com que a maioria das indústrias desse segmento estivessem funcionando na capacidade máxima instalada (Sindcalge, 2021). Dados mais atuais, conforme o presidente do Sindcalge, mencionam que as fábricas já estão operando no limite da capacidade instalada e tão logo devem anunciar investimentos em ampliação. “Ao que tudo indica as indústrias devem colocar novos fornos ‘em marcha’”, revela (Sindcalge, 2023).

A cal é um produto mineral amplamente utilizado em diversas indústrias devido às suas propriedades únicas e versatilidade de aplicação. Obtida através da calcinação do calcário, a cal é disponibilizada em diferentes formas, como cal virgem, cal hidratada e cal extinta, cada uma com suas características específicas. O calcário é uma rocha sedimentar formada principalmente a partir dos restos de conchas, esqueletos, corais e outros materiais orgânicos marinhos. Ele é composto principalmente de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), que é o mineral predominante. A britagem da rocha calcária objetiva produzir partículas com granulometria adequada ao forno utilizado na calcinação. O material britado é usualmente armazenado ao ar livre organizado em pilhas tipo silo trincheira. Os finos gerados não podem ser calcinados, mas podem ser comercializados como agregado, moído como *filler* ou para a produção de calcário agrícola (VOTORANTIM, 2014).

A calcinação visa decarbonatar o calcário, isto é, remover o  $\text{CO}_2$  combinado com os óxidos de cálcio ou magnésio, para a produção de cal virgem. O processo ocorre em fornos que operam em altas temperaturas (entre 900 e 1200 °C) (Eippcb; Ipts, 2013; Silva, 2007).

Conforme Seabra, (2014a), a moagem da cal virgem obtida é feita em moinhos, a escolha deste dependerá das características específicas do calcário a ser moído, da granulometria desejada do produto final e das exigências do processo industrial, e visa diminuir a sua granulometria a tamanhos adequados para sua destinação final ou à hidratação sendo estocada em silos ou transportado até o hidratador. De forma geral, a produção da cal virgem passa pelas seguintes etapas: mineração do calcário, britagem, calcinação e moagem.

Segundo a Norma brasileira 7175 (Abnt, 2003), a cal hidratada é um pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio. Este se obtém através da reação da cal com água, que gera um processo químico que depende da quantidade de água utilizada, sendo obtido um produto seco, em pasta ou em calda, também conhecido como leite de cal (Coelho, 2009; Guimarães, 2002).

Conforme Paiva (2007), para se ter uma cal hidratada de boa qualidade se faz necessário um controle desde o minério até a forma na qual é feita a hidratação. A cal hidratada pode ser obtida industrial ou artesanalmente, de modo que para se ter uma qualidade do produto é importante a industrialização do processo. Conforme Seabra, (2014a), a hidratação da cal de forma industrial é feita em hidratadores, com produção contínua ou por batelada. Este processo, ao adicionar água, transforma os óxidos de cálcio (CaO) ou magnésio (MgO) em hidróxidos de cálcio ou magnésio, substâncias adequadas para os diversos mercados (Silva, 2007; Coelho, 2009).

Cabe salientar que, tanto a cal virgem quanto a cal hidratada, são classificadas conforme a composição do calcário, o qual deu origem às mesmas. Os dolomitos são formados basicamente por Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e Magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ). A cal hidratada, por exemplo, possui várias propriedades que favorecem a sua utilização em diversas indústrias, como a trabalhabilidade, boa aderência, retenção de água, durabilidade, maior rendimento na mão-de-obra, bactericida, entre outros (Teixeira, 2013). Alguns produtos em que a cal hidratada é parte integrante do processo de manufatura são: adesivos, selantes, adsorventes, metais e ligas, biocidas, revestimentos, tintas, diluentes, betumes, gesso, explosivos, adubos, combustíveis. Além disso, é utilizada em fluidos de transferência de calor e hidráulicos, tintas e *toners*, como reguladores de PH, floculantes, precipitantes, agentes de neutralização, produtos químicos de laboratório, curtimento de couro, lubrificantes, produtos farmacêuticos, misturas de cera, preparação de polímeros e compostos, entre outros (Echa, 2014).

A produção da cal hidratada agrega as fases de extração do calcário, britagem e moagem, hidratação e classificação (Coelho, 2013).

Por todo o exposto pode se inferir que as características da cal virgem e hidratada, e por tanto os seus usos, estão influenciados por diversos parâmetros

tanto no processo de calcinação quanto na hidratação. O presente estudo visou avaliar as características de amostras de cal virgem e hidratada, provenientes de uma indústria da região sul do estado do Rio Grande do Sul. Identificou-se o comportamento térmico por perda de massa, densidade e distribuição granulométrica. Foram avaliadas as propriedades relacionadas com a composição elementar e mineralógica das mesmas, mediante fluorescência e difração de raios-X, com o qual obteve-se informação quanto a sua classificação, conforme concentrações de cálcio e magnésio presentes nas amostras.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estudar o processo, matérias primas e produtos de uma indústria de mineração de calcário, a fim de identificar aspectos que possam ser otimizados.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Descrever o processo geral de produção para cal virgem e cal hidratada, e compará-lo com o analisado em uma indústria do Rio Grande do Sul;
- Caracterizar em amostras específicas: TGA (comportamento térmico por perda de massa) do calcário e da cal hidratada, distribuição granulométrica da cal virgem, fluorescência e difração de raios-X (mineralogia e composição elementar) da cal virgem e hidratada;



### **3 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA**

Esta seção abordará sobre as propriedades da cal virgem produzida na indústria, o seu método de hidratação, as operações unitárias e tecnologias mais importantes relacionadas à produção da cal virgem e hidratada.

#### **3.1 Produtos do Calcário**

O calcário é uma rocha sedimentar comum encontrada em todo o mundo, desempenhando um papel significativo em diversas aplicações industriais e ambientais. Existem diferentes tipos de calcário, variando em termos de composição e origem geológica. Em sua forma mais básica, o calcário é composto principalmente de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), sendo a calcita a forma cristalina predominante. A formação do calcário ocorre ao longo de períodos geológicos, através da deposição de conchas, esqueletos marinhos e matéria orgânica em ambientes aquáticos. Este ciclo de formação, associado à transformação subsequente em rocha sedimentar, é fundamental para a exploração e utilização do calcário em diversas indústrias. (Manning, P. G., 2004).

De acordo com a NBR 7175, a cal é categorizada em três principais tipos: cal virgem, cal hidratada e cal extinta. Essa classificação é essencial para determinar as aplicações específicas de cada tipo de cal e garantir sua qualidade e eficácia (ABNT, 2003). A cal virgem, conforme definida pela norma, é o produto obtido pela calcinação do calcário em fornos apropriados, sem contato com água. Esse processo resulta na obtenção de óxido de cálcio, que é essencial em diversas indústrias, como a construção civil e a indústria química. Por sua vez, a cal hidratada é produzida a partir da reação da cal virgem com água, formando hidróxido de cálcio. Esse tipo de cal é amplamente utilizado na agricultura, como corretivo de solo, e na construção civil, principalmente na preparação de argamassas e revestimentos. Finalmente, a cal extinta é resultado da reação da cal virgem ou hidratada com dióxido de carbono, gerando carbonato de cálcio. Esse tipo de cal é essencial em processos industriais, como na fabricação de vidro, na produção de produtos químicos e na neutralização de efluentes. Portanto, a norma NBR 7175 desempenha um papel crucial ao estabelecer os requisitos mínimos de qualidade e

os métodos de análise para a cal, garantindo sua adequação aos diferentes usos industriais e comerciais.

### 3.1.1 Óxido de cálcio ou cal virgem

O óxido de cálcio, também conhecido como cal virgem ou cal viva, é um composto químico inorgânico de fórmula CaO, que é obtido a partir da calcinação do carbonato de cálcio em altas temperaturas, processo que resulta na perda de dióxido de carbono e na formação do óxido de cálcio. É um sólido branco e cristalino, altamente reativo e básico, com ponto de fusão de 2.613°C (Greenwood & Earnshaw, 1997).

O processo de calcinação do calcário desempenha um papel crucial na produção de cal, transformando o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) em cal viva (CaO). A razão de calcinação refere-se à proporção estequiométrica (Equação 1) entre o carbonato de cálcio e o óxido de cálcio na reação química. Em termos simples, a equação química balanceada para a calcinação do calcário é representada por:



na qual um mol de carbonato de cálcio se transforma em um mol de óxido de cálcio e libera dióxido de carbono como subproduto. O entendimento preciso dessa reação é fundamental para controlar o processo de produção de cal e otimizar a eficiência. As obras de "Smith, J. K. (2005)" oferecem uma visão abrangente sobre os aspectos fundamentais da calcinação e seus efeitos nas propriedades da cal produzida.

O carbonato de cálcio, geralmente encontrado na forma de minério de calcário, pode conter impurezas, como o magnésio. Durante o processo de calcinação, em que o calcário é submetido a altas temperaturas para produzir cal viva (CaO), a presença de magnésio pode resultar na formação de uma mistura de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO). A coexistência desses óxidos na cal resultante pode impactar as propriedades finais do produto (Adams, J., 1999).

A diferença entre calcário e dolomito se refere à relação CaCO<sub>3</sub>/MgCO<sub>3</sub>, sendo, portanto, classificados como calcário se a relação CaCO<sub>3</sub>/MgCO<sub>3</sub> é maior

do que 10; Calcário Magnesiano se for entre 10 e 3,5; Calcário Dolomítico se for de 3,5 a 1,5 e Dolomito se estiver compreendido no intervalo entre 1,5 a 1,2 (Guimarães, 2002).

O óxido de cálcio é amplamente utilizado na construção civil, na produção de argamassas e concretos, sendo adicionado em pequenas quantidades para acelerar o processo de hidratação do cimento e melhorar a resistência mecânica do material (Mehta & Monteiro, 2014). Outra característica importante é a alta capacidade de neutralização de ácidos, o que faz do óxido de cálcio um importante corretivo de solo, utilizado na agricultura para aumentar o pH (potencial hidrogeniônico) do solo e melhorar a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Também é utilizado na purificação de água, para remover íons de metais pesados e outras impurezas, e na produção de açúcar, para clarificar o caldo de cana-de-açúcar, retirando as impurezas e melhorando a qualidade do produto final (Greenwood & Earnshaw, 1997).

Além disso, esse composto é amplamente utilizado na indústria, na produção de vidro, entre outras aplicações. Possui diversas aplicações devido às suas características físicas e químicas. Uma de suas melhores características é a capacidade de reagir com a água, formando hidróxido de cálcio e gerando calor, processo conhecido como hidratação (Greenwood & Earnshaw, 1997). Na indústria siderúrgica é utilizado como agente desulfurante para remover impurezas do ferro e do aço, contribuindo para a produção de materiais de alta qualidade. Além disso, o óxido de cálcio é utilizado na indústria de papel e celulose como reagente químico para o processo de branqueamento da celulose, tornando-a mais clara e de maior qualidade (Tavares et al., 2018).

Outra aplicação importante do óxido de cálcio é na indústria de petróleo, onde é utilizado na produção de fluidos de perfuração, ajudando a controlar a viscosidade do fluido e a estabilizar as formações geológicas durante o processo de perfuração. No entanto, a manipulação inadequada desse composto pode representar riscos à saúde, uma vez que pode causar irritação nos olhos, pele e trato respiratório, além de ser corrosivo. Portanto, é importante seguir as precauções adequadas no manuseio desse composto químico (Murray, 2018).

Devido à sua ampla gama de aplicações em diversos setores industriais, o óxido de cálcio é um material de grande importância econômica, contribuindo para

o desenvolvimento de diversos países e para a produção de materiais de alta qualidade em diferentes setores (Zhang et al., 2021; Almeida et al., 2020).

### 3.1.2 Cal hidratada

A cal hidratada é um composto químico inorgânico obtido a partir da reação do óxido de cálcio com água, processo conhecido como hidratação. A fórmula química da cal hidratada é  $\text{Ca(OH)}_2$  e ela é frequentemente utilizada na construção civil, na agricultura, na indústria química e em outros setores. Ela é produzida a partir da adição de água ao óxido de cálcio, processo que gera calor e uma reação exotérmica. A hidratação é uma reação química reversível, ou seja, a cal hidratada pode ser transformada novamente em óxido de cálcio por meio de um processo de aquecimento (Greenwood & Earnshaw, 1997).

A reação de hidratação da cal é um processo fundamental no qual a cal viva ( $\text{CaO}$ ) reage com a água para formar cal hidratada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). A equação química (Equação 2) balanceada para essa reação é representada por:



Durante esse processo exotérmico, a água é incorporada à cal viva, resultando em um produto que possui propriedades distintas e é amplamente utilizado em diversas aplicações industriais e ambientais (Brown, T., 2007).

Na construção civil, a cal hidratada é frequentemente utilizada na produção de argamassas e revestimentos, pois melhora a aderência, a trabalhabilidade e a resistência do material, além de contribuir para a estabilidade da estrutura. Portanto, a cal hidratada é amplamente utilizada em diversas áreas devido às suas características físicas e químicas favoráveis (Lima et al., 2013).

Outra característica importante é a capacidade de reagir com o dióxido de carbono presente no ar, processo conhecido como carbonatação, formando carbonato de cálcio e hidróxido de cálcio. Esse processo ajuda a proteger as estruturas de concreto e argamassa da ação de agentes agressivos, como a água e os sais presentes no solo (Mehta & Monteiro, 2014).

Além disso, a cal hidratada é um corretivo de solo eficiente, capaz de aumentar o pH e melhorar a disponibilidade de nutrientes para as plantas,

melhorando a produtividade das lavouras e, conseqüentemente, contribuindo para o aumento da produção de alimentos. Também é utilizada na indústria química como um reagente químico para a produção de diversos produtos, como plásticos, produtos químicos, entre outros. É utilizada na remoção de gases ácidos, como dióxido de carbono, dióxido de enxofre e em processos industriais. Por fim, a cal hidratada é uma substância não tóxica e não inflamável, o que a torna segura para manuseio e transporte (Greenwood & Earnshaw, 1997).

A cal hidratada é um material relativamente econômico e de fácil acesso, o que a torna uma opção viável economicamente para diversas aplicações. Portanto, a cal hidratada é um material de grande importância econômica, com diversas aplicações em diferentes setores e que contribui para o desenvolvimento econômico de diversos países. Além disso, o seu processo de produção é relativamente simples, utilizando matérias-primas abundantes na natureza, como calcário e água (Graça et al., 2015).

### **3.2 Tecnologias e operações unitárias da cal virgem e hidratada**

As tecnologias e operações unitárias envolvidas na produção da cal virgem e hidratada são essenciais para garantir a qualidade do produto final. A produção de cal virgem, por exemplo, envolve a calcinação de calcário, conforme reação mostrada no item anterior, em fornos a altas temperaturas, seguida da hidratação do óxido de cálcio resultante em um processo exotérmico, que pode gerar riscos de segurança se não for realizado adequadamente (Santos et al., 2016).

Já a produção de cal hidratada envolve a hidratação do óxido de cálcio com água em condições controladas, a fim de obter um produto com alto grau de pureza e homogeneidade (Lopes et al., 2019).

As tecnologias e operações unitárias também são importantes para garantir a eficiência do processo e reduzir o impacto ambiental da produção de cal. Por exemplo, o uso de fornos rotativos com tecnologia de pré-aquecimento pode reduzir significativamente o consumo de energia e as emissões de CO<sub>2</sub> durante a calcinação do calcário (Liu et al., 2019).

A norma NBR 6453, desenvolvida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), é uma referência essencial para compreender as características e os requisitos técnicos da cal. Ela estabelece diretrizes para a produção, classificação e comercialização deste importante produto mineral. Portanto, a norma NBR 6453 desempenha um papel fundamental ao estabelecer os critérios de qualidade e as especificações técnicas para a produção e comercialização da cal, garantindo sua adequação aos diferentes usos industriais e comerciais (ABNT, 2003).

No que diz respeito ao armazenamento da cal, a NBR 6473 define requisitos específicos para os locais de estocagem, como a necessidade de áreas cobertas e ventiladas, capazes de proteger o produto da umidade e de variações extremas de temperatura, que podem comprometer sua qualidade (ABNT, 2003). Portanto, a norma NBR 6473 desempenha um papel fundamental ao estabelecer as diretrizes para o transporte, manuseio e armazenamento seguros da cal, garantindo sua integridade e preservando a segurança dos trabalhadores envolvidos.

### **3.2.1 Fornos**

Os fornos de calcinação são equipamentos essenciais no processo de produção da cal, tendo como objetivo principal a decomposição térmica do carbonato de cálcio presente no calcário, resultando na obtenção da cal virgem. Esses fornos são projetados para proporcionar condições controladas de temperatura e tempo de residência, visando obter uma calcinação eficiente e de alta qualidade (Smith et al., 2020).

Durante o processo de calcinação, o calcário é introduzido no forno de forma controlada. À medida que o calcário é aquecido, ocorre a liberação de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), resultando na formação de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), conhecido como cal virgem. Esse processo é conhecido como calcinação e ocorre em temperaturas elevadas, geralmente acima de  $900^\circ\text{C}$  (Johnson et al., 2018).

Os fornos de calcinação são projetados com sistemas de aquecimento adequados, como queimadores ou fornalhas, que fornecem a energia térmica necessária para elevar a temperatura dentro do forno. Esses sistemas de aquecimento podem ser alimentados por diferentes tipos de combustíveis, como

carvão, gás natural, óleo combustível ou biomassa, dependendo das condições locais e da disponibilidade de recursos (Brown et al., 2019).

Além disso, os fornos de calcinação são construídos com materiais refratários de alta resistência térmica, capazes de suportar as altas temperaturas do processo. Esses materiais refratários, como tijolos refratários ou concretos refratários, são selecionados para garantir a durabilidade e a eficiência do forno, resistindo ao desgaste e à corrosão causados pela exposição a altas temperaturas e produtos químicos (Davis et al., 2021).

A operação dos fornos de calcinação requer um controle cuidadoso da temperatura, do tempo de residência, fluxo de gás e composição da atmosfera, a fim de garantir a qualidade e a consistência do produto final, a cal virgem. O monitoramento adequado desses parâmetros permite otimizar a produção, minimizar perdas e garantir a conformidade com as especificações técnicas e normas de qualidade (Miller et al., 2022).

Existem diferentes tipos de fornos de calcinação utilizados na produção de cal, cada um com características específicas e aplicabilidades distintas. Neste contexto, diversos estudos têm abordado a análise e a comparação desses diferentes tipos de fornos, fornecendo informações importantes sobre suas vantagens e desvantagens.

Na sequência será apresentado os principais tipos de fornos e suas características:

- 1) Forno Rotativo: Um tipo comumente utilizado é o forno rotativo, que consiste em um cilindro rotativo inclinado, onde o calcário é alimentado na extremidade mais alta e percorre o forno enquanto é aquecido. São amplamente utilizados no processo de produção de cal devido à sua eficiência e capacidade de produção em larga escala. Durante a operação, o calcário é aquecido através da queima de combustíveis no interior do forno, como carvão, gás natural ou óleo combustível. À medida que o calcário se move através do forno rotativo, ocorre a liberação de dióxido de carbono e a transformação em óxido de cálcio, que é o produto final da calcinação do calcário. Os fornos rotativos são projetados para garantir uma distribuição uniforme de calor e uma boa transferência de massa e calor entre o material e os gases quentes, proporcionando assim uma calcinação eficiente do calcário (Oates, 1998).

Um estudo realizado por Zhang et al. (2021) comparou o desempenho de fornos rotativos convencionais com fornos rotativos modificados, estes passam por adaptações específicas para atender requisitos exclusivos de aplicação como controle de temperatura e atmosfera, tamanho e capacidade, fluxo de material, controle de velocidade e outros fatores, apresentando os benefícios da modificação na melhoria da eficiência energética e na redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

A formação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é um aspecto crucial no processo de calcinação, sendo gerado tanto pela reação de calcinação quanto pela combustão do combustível que fornece a energia necessária para esse processo. Conforme destacado por Smith et al. (2010).

Figura 1 – Exemplo de imagem representando um forno rotativo.



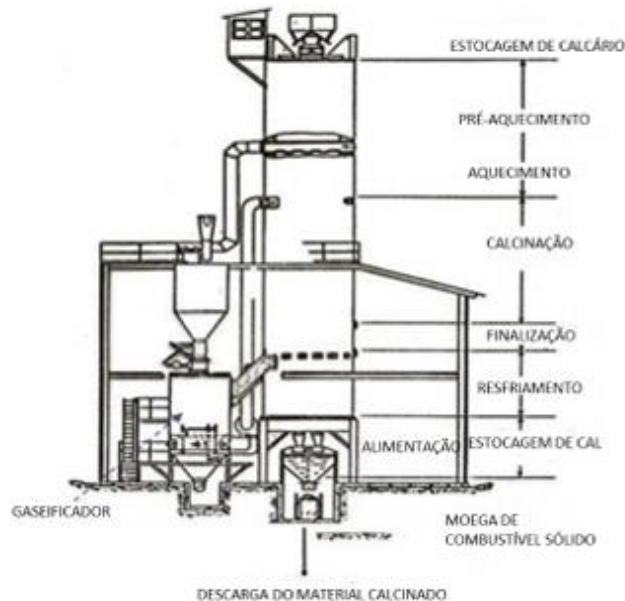
Fonte: Adaptado de Melo et al., 2012.

- 2) Fornos de leito fluidizado: o calcário é suspenso e fluidizado por um fluxo de ar ou gás quente, com partículas inertes, como areia, e submetido a altas temperaturas. O ar ou gás passa através do leito, proporcionando uma calcinação eficiente. Esse tipo de forno apresenta uma alta taxa de transferência de calor e uma excelente homogeneização do material, resultando em uma calcinação eficiente. Um estudo conduzido por Wang et al. (2019) investigou o



desempenho de um forno de leito fluidizado em comparação com um forno rotativo, destacando as vantagens do forno de leito fluidizado em termos de eficiência energética e qualidade do produto final.

Figura 2 – Exemplo de figura representando um forno fluidizado.



Fonte: Paiva et al., 2007.

Cada tipo de forno de calcinação apresenta vantagens e desvantagens específicas, e a escolha do melhor tipo depende das características do calcário, dos requisitos de produção e das condições locais.

3) Forno de Calcinação Vertical: Também conhecido como forno de eixo único, forno de torre ou forno de suspensão, é composto por um cilindro vertical onde o calcário é alimentado pela parte superior e desce gradualmente à medida que é calcinado. O calor é gerado através da queima de combustíveis (Adaptado de Lapa Vermelha, 2014). Os gases quentes sobem no sentido contrário, proporcionando a transferência de calor necessária para a calcinação.

Figura 3 – Exemplo de imagem representando um forno vertical.



Fonte: Adaptado de Lapa Vermelha, 2014.

Os fornos verticais de cuba simples são constituídos por uma câmara vertical de cerca de 30 metros de altura e diâmetro de 6 metros. A alimentação do calcário ocorre pela parte superior passando pelos diversos estágios até a saída da cal pela parte inferior, como os desenvolvidos pela Maerz, desempenham um papel crucial na produção de cal, fornecendo uma abordagem eficiente e econômica para esse processo. A Maerz, uma empresa líder neste setor, tem contribuído significativamente para o avanço da tecnologia de fornos verticais, oferecendo soluções inovadoras para atender às demandas da indústria. De acordo com Smith (2020), os fornos verticais da Maerz são projetados com características específicas que otimizam a produção de cal, proporcionando maior flexibilidade operacional e eficiência energética.

A eficiência dos fornos verticais da Maerz é notável na capacidade de lidar com uma variedade de matérias-primas, desde calcários convencionais até resíduos industriais. Segundo as pesquisas de Jones (2019), esses fornos são projetados para maximizar a utilização de recursos disponíveis, contribuindo para uma produção sustentável de cal. A flexibilidade desses fornos é particularmente destacada, permitindo a adaptação a diferentes tipos de carga, o que é fundamental para a otimização do processo, conforme observado por Brown (2018).

Um dos aspectos distintivos dos fornos verticais da Maerz é a sua capacidade de alcançar altas temperaturas de forma eficiente. Conforme discutido por White (2021), essa característica é crucial para garantir a qualidade do produto final, pois influencia diretamente na decomposição térmica do carbonato de cálcio. A capacidade de atingir temperaturas elevadas de maneira controlada destaca a tecnologia de ponta empregada nos fornos da Maerz, como indicado por Green (2017).

- 4) Fornos de Alvenaria: Estes são “produtos artesanais” de uma ou múltiplas câmaras, bastante rudimentares. São fornos construídos de alvenaria, quase sempre apoiados em encostas – o que facilita a carga de calcário na sua parte superior, já que tanto a carga quanto a descarga são manuais ou semiautomáticas. O combustível é inserido pela parte inferior do forno. De forma geral, estes fornos não têm zona de resfriamento nem tampouco recirculam os gases aquecidos, sendo a eficiência energética baixa. Os fornos de alvenaria e de fluxo paralelo regenerativo demarcam os extremos de menor e maior eficiência energética, emissões de CO<sub>2</sub> e de tecnologia empregada (SEABRA, 2014a).

Figura 4 – Exemplo de figura representando um forno vertical de alvenaria.



Fonte: PANORAMIO, 2014.

No Paraná, predominam fornos de alvenaria (semi-contínuos), em grande parte com sopradores para a queima de serragem proveniente da indústria madeireira ou fornos movidos a cavaco de madeira.

### **3.2.2 Hidratadores**

O processo de hidratação da cal é também chamado de "Slaking process" e pode ter produção contínua ou por batelada. Para a produção de suspensões de cal hidratada com quantidades de 30% a 40% de sólidos, a água utilizada para a hidratação da cal é maior (em volume) do que a estequiométrica, variando de uma proporção água/cal de aproximadamente 3:1 (para cales calcíticas) e de 2:1 (para cales dolomíticas), dependendo da pureza e da reatividade da cal. Hidratadores são equipamentos importantes no processo de produção de cal, responsáveis pela transformação do óxido de cálcio (cal viva) em hidróxido de cálcio (cal hidratada) por meio da adição controlada de água. Esses equipamentos são projetados para garantir uma mistura eficiente entre a água e o óxido de cálcio, resultando na formação de partículas de cal hidratada finamente dispersas. Existem diferentes tipos de hidratadores utilizados na indústria da cal, cada um com suas características distintas, e a qualidade da cal hidratada é influenciada por vários parâmetros que podem afetar suas propriedades físicas e químicas. Alguns dos principais fatores incluem: pureza da matéria-prima, tempo de hidratação, proporção água/cal, temperatura do processo e armazenamento (Bernal & Suárez, 2014).

A adequada estocagem da cal hidratada é crucial para garantir sua qualidade e eficácia em diversas aplicações, e vários especialistas destacam a importância de cuidados específicos para preservar as propriedades do produto ao longo do tempo. Conforme discutido por Smith (2020) em seu livro "Chemical Storage Techniques", é essencial proteger a cal hidratada contra a umidade. A absorção excessiva de água pode comprometer a qualidade do produto, levando a reações indesejáveis. Portanto, recomenda-se armazenar a cal em locais secos e utilizar embalagens que minimizem a entrada de umidade.

Além disso, Jones (2019), em seu livro "Environmental Impacts on Chemicals," destaca a importância da temperatura de armazenamento. Variações extremas de temperatura podem impactar negativamente a estabilidade da cal

hidratada. Assim, é aconselhável armazená-la em ambientes com temperatura controlada para evitar alterações indesejáveis em suas propriedades.

A exposição à luz solar também deve ser cuidadosamente considerada, como indicado por Garcia (2021) em seu trabalho "Photobiology of Construction Materials." A radiação ultravioleta pode desencadear reações prejudiciais que comprometem as propriedades do material. Portanto, o armazenamento em áreas sombreadas ou em embalagens opacas é recomendado para proteger a cal contra os efeitos nocivos da luz solar.

Brown (2018), no livro "Chemical Storage Handbook," destaca a importância da segregação adequada durante o armazenamento. A cal hidratada deve ser mantida separada de materiais incompatíveis que possam comprometer sua qualidade. Essa prática é essencial para garantir a integridade do produto ao longo do tempo.

Na sequência será apresentado diferentes modelos de hidratadores e suas características:

- 1) Hidratadores de Leito Fluidizado: Esses hidratadores utilizam um fluxo contínuo de ar ou gases quentes para dispersar a água e promover a hidratação do óxido de cálcio. O calcário é alimentado em um leito fluidizado, onde ocorre a reação de hidratação. A utilização do leito fluidizado proporciona uma área de contato ampla entre o óxido de cálcio e a água, permitindo uma hidratação eficiente e rápida (Zhang et al., 2019).

Figura 5 – Exemplo de figura representando um hidratador de leito fluidizado.



Fonte: STM Technologies Srl.

- 2) Hidratadores de Tambor: Os hidratadores de tambor consistem em um tambor rotativo vertical ou horizontal onde o óxido de cálcio é misturado com água. A rotação do tambor promove uma mistura intensiva dos componentes, resultando em uma reação de hidratação uniforme e completa. Esses hidratadores são frequentemente utilizados em plantas de pequena e média escala de produção de cal (Emami et al., 2018).

Figura 6 – Exemplo de figura representando um hidratador de tambor.



Fonte: STM Technologies Srl.

### **3.3 Técnicas de caracterização de produtos e reagentes do processo da cal virgem e hidratada**

A caracterização dos produtos e reagentes envolvidos no processo da cal virgem e hidratada é fundamental para entender e controlar a qualidade da cal produzida (Bernal & Suárez, 2014).

Existem diversas técnicas de caracterização disponíveis para analisar a hidratação da cal. Algumas das técnicas mais comuns incluem análise química, análise termogravimétrica, difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia infravermelha e espectroscopia Raman (Bernal & Suárez, 2014; Perea et al., 2018).

A análise química é uma técnica útil para medir a quantidade de CaO e Ca(OH)<sub>2</sub> presentes na amostra. A análise termogravimétrica é uma técnica que mede a variação de massa da amostra com a temperatura, permitindo a determinação da quantidade de água presente (Bernal & Suárez, 2014; Perea et al., 2018). A difração de raios-x pode ser usada para identificar a presença de diferentes fases cristalinas na amostra.

Os resultados das análises obtidos por diferentes autores podem variar dependendo das condições experimentais, da origem e qualidade da matéria-prima utilizada, do método de produção e das técnicas de caracterização empregadas na amostra analisada (Bernal & Suárez, 2014; Perea et al., 2018). É importante levar em consideração essas variáveis ao comparar os resultados obtidos por diferentes autores.

Um estudo comparativo realizado por Bernal e Suárez, 2014, avaliou a qualidade da cal hidratada produzida a partir de diferentes matérias-primas, calcário ou dolomita, por exemplo, e métodos de produção que inclui a calcinação e hidratação. Os autores utilizaram análise química, análise termogravimétrica, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura para caracterizar as amostras.

A seguir serão mencionadas as técnicas comumente utilizadas para caracterizar as matérias primas e os produtos da indústria de processamento de cal (calcário, cal virgem e cal hidratada).

### 3.3.1 DRX

A difração de raios-X (DRX) é uma técnica importante para a mineralogia, pois permite a identificação de minerais e a determinação de sua estrutura cristalina, incluindo o tamanho de cristal, a orientação preferencial e a presença de defeitos cristalinos. É, portanto, uma técnica que permite a identificação precisa de minerais em uma amostra complexa (Moore & Reynolds Jr., 1997; Gualtieri, 2020).

Segundo Deer et al. (2013), a análise de DRX é particularmente útil para a identificação de minerais em amostras de rochas e sedimentos, uma vez que muitos minerais têm padrões de difração de raios-X distintos que permitem sua identificação.

A análise de DRX é amplamente utilizada na mineralogia devido à sua alta precisão e sensibilidade, além de ser uma técnica não destrutiva que não requer a preparação de amostras complexas. Essa técnica pode ser usada para estudar uma ampla variedade de amostras, desde rochas e minerais até materiais sintéticos (Gualtieri, 2020; Moore & Reynolds Jr., 1997).

O difratograma de um calcário geralmente mostra picos de difração característicos de minerais como calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). A calcita é o mineral predominante no calcário e é identificado por picos intensos em baixos ângulos de difração. O pico mais intenso da calcita costuma ocorrer em torno de  $29,4^\circ$  ( $2\theta$ ) nos difratogramas de raios-X. Outros picos em baixos ângulos podem ser observados, dependendo das condições específicas do calcário analisado. A presença de dolomita pode ser indicada por picos adicionais a ângulos de difração mais altos. Já o quartzo geralmente aparece como picos de menor intensidade. Esses difratogramas são úteis para determinar a composição mineralógica do calcário e auxiliar na avaliação de sua qualidade como matéria-prima para a produção de cal (Bernal & Suárez, 2014).

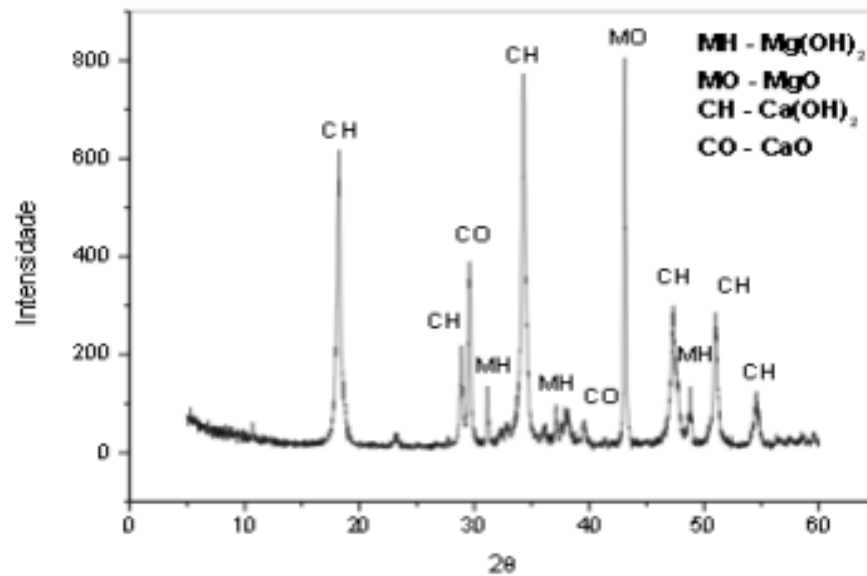
No caso da cal virgem, o difratograma pode mostrar a presença de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) como o principal constituinte. O difratograma da cal virgem geralmente



exibe um pico intenso e afiado a um ângulo de difração específico de 32,1 graus, indicando a presença da estrutura cristalina do CaO. A análise da forma, intensidade e largura desse pico pode fornecer informações sobre a cristalinidade e a qualidade da cal virgem (Bernal & Suárez, 2014; Perea et al., 2018).

Em um difratograma típico de MgO, você pode observar picos em baixos ângulos de difração, sugerindo a presença de estruturas cristalinas de larga escala. O pico mais intenso costuma ocorrer em torno de 36,9° (2 $\theta$ ). Esse valor é característico da fase cúbica do MgO. Os difratogramas típicos do hidróxido de magnésio, que pode se apresentar na forma de brucita (Mg(OH)<sub>2</sub>), revelam padrões distintos de difração de raios X, com pico intenso ocorre em torno de 18,5° (2 $\theta$ ). Por fim, o difratograma da cal hidratada mostra a presença de hidróxido de cálcio. Nesse caso, os picos de difração são geralmente mais largos e menos intensos em comparação com os difratogramas de calcário ou cal virgem, o pico intenso ocorre em torno de 18,5° (2 $\theta$ ), mas a posição exata dos picos pode variar ligeiramente dependendo das condições de análise. Essa amplidão e redução da intensidade são resultado da menor cristalinidade do hidróxido de cálcio em comparação com a calcita ou o óxido de cálcio. Além disso, a presença de picos adicionais ou deslocamento dos picos em relação aos valores esperados para a cal hidratada pode indicar a presença de impurezas ou outras fases cristalinas (Bernal & Suárez, 2014; Perea et al., 2018).

Figura 7 – Gráfico Difratoograma da Cal Virgem e Cal hidratada.



Fonte: Pengst, 2001.

Pengst analisou o gráfico (figura 7) e observou que a cal hidratada é constituída basicamente de óxidos de cálcio e magnésio, com a presença de picos referentes à MgO em aproximadamente 42°, CaO em aproximadamente 29°, Ca(OH)<sub>2</sub> em aproximadamente 18°, 29°, 35°, 48°, 51°, 55° e Mg(OH)<sub>2</sub> em aproximadamente 31°, 35° e 48°.

Essas informações são gerais e descrevem as características típicas dos difratogramas de calcário, cal virgem e cal hidratada. É importante lembrar que os difratogramas podem variar dependendo das condições específicas do material, como a composição química, a origem da matéria-prima e as condições de processamento (Bernal & Suárez, 2014; Perea et al., 2018).

### 3.3.2 Fluorescência de raios-X

A fluorescência de raios-X é um fenômeno físico no qual os átomos de um material emitem raios-X quando são excitados por radiação de alta energia. A técnica de fluorescência de raios-X é amplamente utilizada em diversas áreas da ciência e da indústria para análise de elementos químicos presentes em amostras sólidas, líquidas ou gasosas. Segundo (Binnemans et al., 2015, a fluorescência de

raios-X é "a emissão de raios-X por átomos que foram excitados eletronicamente por colisão com raios-X ou partículas carregadas".

A fluorescência de raios-X tem sido amplamente utilizada na análise de materiais como o calcário, a cal virgem e a cal hidratada. Diversos estudos têm fornecido resultados interessantes sobre a composição desses materiais por meio dessa técnica.

Um estudo realizado por (Oliveira et al., 2019) investigou a composição química do calcário utilizando fluorescência de raios-X. Os autores observaram que a técnica foi capaz de identificar a presença de elementos como cálcio (Ca) 65%, carbono (C) 2%, oxigênio (O) 2% e silício (Si) 3% no calcário.

No que diz respeito à cal virgem, um estudo realizado por (Souza et al., 2020) utilizou a fluorescência de raios-X para analisar a composição química desse material. Os pesquisadores identificaram a presença de elementos como cálcio (Ca) 69%, magnésio (Mg) 21%, ferro (Fe) 4%, oxigênio (O) 2% e carbono (C) 1%. Esses resultados forneceram informações sobre a pureza da cal virgem e sua adequação para diferentes aplicações.

No contexto da cal hidratada, um estudo conduzido (Santos et al., 2021) utilizou a fluorescência de raios-X para investigar a composição química desse material. Os autores encontraram uma maior presença de cálcio (Ca) 68% e oxigênio (O) 10% na cal hidratada em comparação com outros elementos. Além disso, eles também observaram a presença de traços de elementos como silício (Si) 3% e alumínio (Al) 2%. Esses resultados auxiliaram na compreensão da composição química da cal hidratada e suas características físicas e químicas.

### **3.3.3 Massa específica**

Segundo Silva et al. (2019), massa específica é a relação entre a massa e o volume de uma substância. É uma propriedade física importante para a caracterização de materiais, sendo utilizada em diversas áreas, como engenharia, química e física. A massa específica é expressa em unidades de massa por unidade de volume, como  $\text{kg/m}^3$  ou  $\text{g/cm}^3$ . A massa específica é uma das propriedades físicas mais relevantes para a caracterização de materiais por permitir a identificação de diferentes tipos de substâncias. A técnica de medida da massa

específica é simples e direta, e pode ser realizada em diferentes tipos de materiais, desde sólidos a líquidos e gases. A massa específica também é uma propriedade importante para o dimensionamento de estruturas e equipamentos, como no caso do projeto de vasos de pressão na indústria química e petroquímica. Além disso, a massa específica é uma propriedade fundamental para a determinação de outras propriedades físicas, como a porosidade e a permeabilidade de materiais.

Em relação ao calcário, estudos como o de (Babu et al., 2016) relataram valores médios de massa específica na faixa de 2,2 g/cm<sup>3</sup> a 2,8 g/cm<sup>3</sup> para diferentes amostras. Esses valores podem variar de acordo com fatores como a composição mineralógica do calcário e a presença de porosidade.

No caso da cal virgem, estudos como o de (Suárez et al., 2019) encontraram valores médios de massa específica variando entre 1,8 g/cm<sup>3</sup> e 2,4 g/cm<sup>3</sup>. Essas variações podem ser atribuídas a diferentes processos de fabricação e à qualidade das matérias-primas utilizadas.

Quanto à cal hidratada, um estudo realizado por (Pappu et al., 2018) encontrou valores de massa específica média em torno de 2,0 g/cm<sup>3</sup> para amostras de cal hidratada. No entanto, é importante considerar que a massa específica pode variar de acordo com a quantidade de água presente e outras características específicas do processo de hidratação, como a quantidade de água, teor de cal, tempo de hidratação, temperatura, tipo de cal, aditivos e impurezas e densidade do agregado.

### **3.3.4 Análise termogravimétrica**

De acordo com Fonseca et al. (2021), Análise Termogravimétrica TGA é uma técnica bastante versátil, que permite avaliar a estabilidade térmica de um material e a composição química de seus componentes. A técnica é realizada em um equipamento chamado termobalança, que é capaz de controlar a temperatura e medir a variação de massa de uma amostra enquanto ela é aquecida em uma atmosfera controlada. A análise termogravimétrica (TGA) é, portanto, uma técnica utilizada para estudar a relação entre a massa de uma substância e a temperatura a que ela é submetida. A TGA é capaz de fornecer informações sobre a decomposição térmica de um material, incluindo a temperatura em que ocorre a

decomposição, a quantidade de massa perdida durante a decomposição e a identificação dos produtos formados.

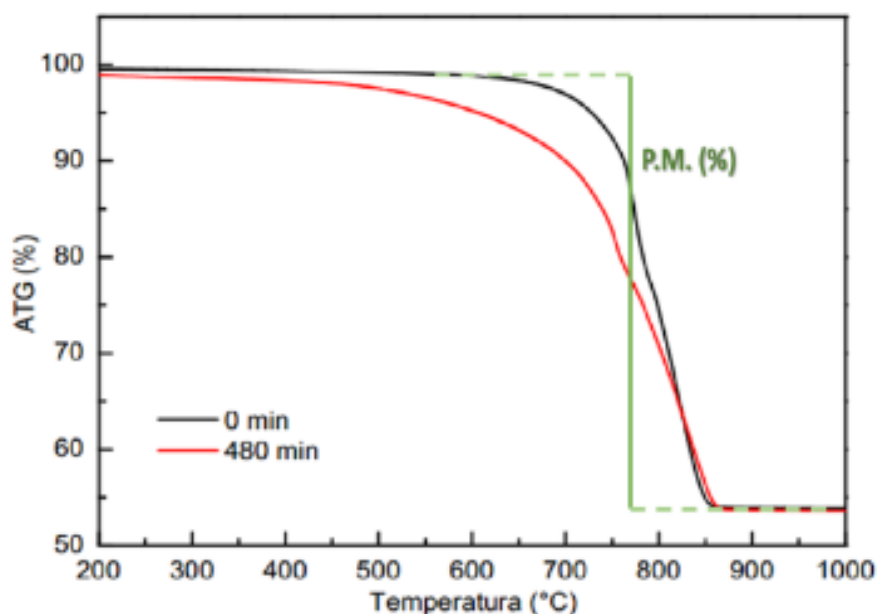
A análise termogravimétrica (TGA), conforme Ionashiro e Giolito (2002), é uma técnica que dentre as inúmeras aplicações existentes, destacam-se a calcinação e torrefação de minerais, decomposição térmica ou pirólise de materiais orgânicos, inorgânicos e biológicos, estudo da cinética das reações envolvendo espécies voláteis, estudo da desidratação e da higroscopicidade e reações no estado sólido que liberam produtos voláteis.

Um estudo relevante no contexto do calcário é o realizado por (Silva et al., 2018), no qual termogramas foram obtidos para investigar as mudanças de estado e decomposição térmica do calcário. Os autores registraram as curvas de decomposição térmica do calcário ao longo de diferentes faixas de temperatura, que variava de aproximadamente 600°C a 1000°C, permitindo a identificação de eventos de perda de água e decomposição de componentes minerais.

No caso da cal hidratada, estudos como o de (Martins et al., 2019) exploraram a termogravimetria para analisar as etapas de perda de água e decomposição térmica da cal hidratada. Os termogramas obtidos permitiram identificar as faixas de temperatura entre 700 a 900°C em que ocorrem as transições de fase e as perdas de massa associadas à liberação de água.

Bairros, Emerson (2017) verificou estas variações, através do gráfico da Figura 8. É possível afirmar que cada amostra analisada, possui grau de decomposição térmica diferente. A avaliação qualitativa da curva TGA foi realizada observando a variação dos acidentes térmicos com relação ao aumento da temperatura.

Figura 8 – Gráfico de perda de massa x temperatura. TGA plotado com os dados de uma amostra de calcário.

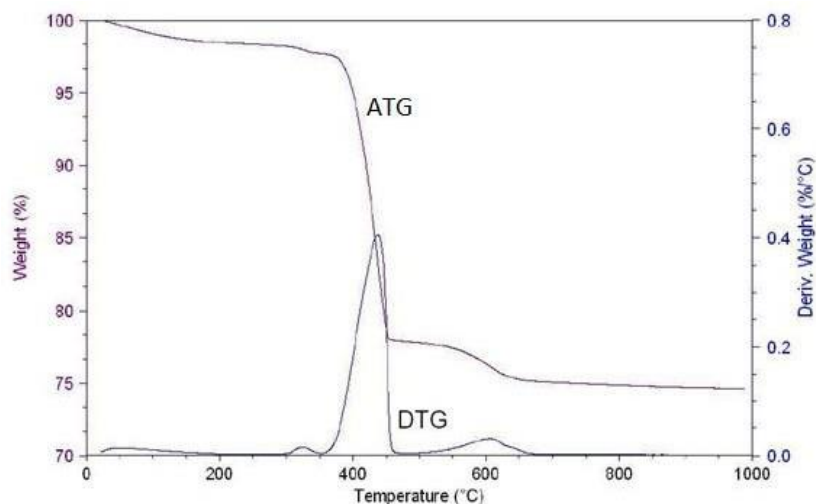


Fonte: Bairros, Emerson, 2017.

O gráfico, para a análise termogravimétrica do calcário observou-se então a variação da perda de massa da amostra aproximadamente em torno de 780°C, isso significa que a curva de TGA apresenta uma queda acentuada na perda de massa nesse ponto, indicando a liberação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante a decomposição térmica do carbonato de cálcio presente no calcário. A temperatura exata de decomposição pode variar dependendo da composição exata da amostra e das condições experimentais, e a interpretação desse gráfico permite entender não apenas a temperatura de decomposição do calcário, mas também a estabilidade térmica da amostra em diferentes faixas de temperatura, o que é crucial para diversas aplicações industriais e ambientais.

Jung e Santagata (2009) realizaram uma análise de TGA em uma amostra de cal hidratada, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 – Gráfico Perda de massa x temperatura. TGA plotado com os dados de uma amostra de cal hidratada.



Fonte: Jung, Santagata, 2009.

Perceberam, então, uma grande perda de peso por volta da temperatura de 450°C, que se deve a decomposição do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Por volta de 600°C houve uma perda de peso menor, que corresponde a espécies de carbonatos de cálcio formados devido à carbonatação. A presença de magnésio nos termogramas de cal hidratada pode ter relação com impurezas ou devido à composição específica da matéria-prima utilizada na produção. E a influência dele pode afetar as características térmicas da cal hidratada. Dependendo da quantidade de magnésio, podem ocorrer mudanças nas temperaturas de decomposição ou na taxa de decomposição térmica. O magnésio pode formar compostos com a cal, influenciando assim os eventos térmicos registrados no termograma.

### 3.4 Processo de Produção da Cal virgem e hidratada

O processo de produção da cal virgem e hidratada em uma empresa mineradora consiste na extração do calcário das jazidas com o uso de explosivos, moagem das rochas em um triturador de mandíbula, seleção das rochas de tamanho homogêneo por peneiras vibratórias, transporte por esteiras para o topo dos fornos de calcinação Brown (2012).





resultando na formação de hidróxido de cálcio. De acordo com Johnson (2015), essa reação é altamente exotérmica, liberando calor durante o processo.

O produto final, a cal hidratada, é armazenado em silos ou outros sistemas de armazenamento adequados. Como observado por Brown (2012), é crucial considerar as condições de armazenamento para garantir a qualidade do produto. Em períodos de baixa temperatura, pode ocorrer um excesso de água no silo de armazenamento, pois a hidratação da cal não foi completa. Medidas devem ser tomadas para remover o excesso de água e garantir a qualidade do produto durante o armazenamento e distribuição.

### **3.5 Fatores do processo de produção da cal virgem e hidratada que influenciam na característica do produto**

Smith (2008), os fatores do processo de produção da cal virgem e hidratada que influenciam na característica do produto, são elementos ou variáveis do processo de fabricação da cal que podem afetar a qualidade e as características do produto final, tanto da cal virgem quanto da cal hidratada.

Alguns fatores do processo de produção da cal virgem e hidratada incluem a fonte de calcário que influencia diretamente as características da cal produzida, os diferentes tipos de calcário que podem conter impurezas que afetam a qualidade do produto final, o método de calcinação que pode variar, como fornos verticais ou rotativos, isso afeta a temperatura e a eficiência da reação, a granulometria do produto final que é influenciada pelo processo de moagem após a calcinação, o tamanho das partículas que pode afetar propriedades como a trabalhabilidade em misturas de construção, o controle de umidade na hidratação que é crítico, influencia a formação do hidróxido de cálcio e as características finais do produto, e o tempo de Hidratação da cal virgem que afeta a extensão da reação química. O controle preciso desse parâmetro é crucial para garantir a qualidade da cal hidratada.

#### **3.5.1 Produção de cal virgem**

A produção de cal virgem envolve uma série de parâmetros e variáveis que influenciam o processo de calcinação. Estes incluem o tamanho da carga, a composição do calcário, a temperatura no forno, o tempo de residência dentro do

forno, o material do forno e o combustível utilizado. O tamanho da carga é um fator importante na produção de cal virgem, pois afeta a eficiência do processo de calcinação. Estudos como o de (Alp et al., 2017) destacam a importância de utilizar calcário com tamanho de partícula adequado, em dimensões padrões, partículas muito grandes podem não ter uma área de superfície adequada para a transferência eficiente de calor, enquanto partículas muito pequenas podem causar problemas de aglomeração. O tamanho de partícula adequado pode variar dependendo do processo e do equipamento utilizado, mas, em geral, as dimensões padrões costumam ser apropriadas.

Para garantir uma boa transferência de calor e calcinação eficiente em um forno rotativo, o calcário é frequentemente triturado para obter um tamanho de partícula que varia de cerca de 2 a 50 milímetros. A composição do calcário também desempenha um papel crucial na produção de cal virgem. Diferentes tipos de calcário possuem diferentes proporções de componentes, como carbonato de cálcio e impurezas. Um estudo de (Galán et al., 2019) analisou a influência da composição do calcário na qualidade da cal virgem produzida, demonstrando que diferentes composições podem afetar a reatividade da cal virgem e suas propriedades físicas e químicas. Essas composições são a pureza do calcário: A presença de impurezas, como argila e sílica, pode reduzir a reatividade da cal virgem, e a presença de magnésio, pode afetar propriedades como a reatividade da cal, a temperatura de calcinação e a composição mineralógica do produto final.

A reatividade da cal virgem refere-se à capacidade do óxido de cálcio (CaO), principal componente da cal virgem, de reagir quimicamente com a água, formando hidróxido de cálcio (Ca (OH)<sub>2</sub>) durante o processo de hidratação. Essa reação é caracterizada pela liberação de calor e é fundamental em diversas aplicações industriais e construção civil. Essa reatividade é fortemente influenciada pela composição química da matéria-prima utilizada na produção.

De acordo com Smith (2008), a pureza do calcário ou dolomita é um fator-chave. Calcários com menor teor de impurezas tendem a produzir cal virgem de maior reatividade, uma vez que impurezas como argila e sílica podem atuar como inibidores químicos, diminuindo a reatividade. Para melhorar a reatividade, o calcário de origem deve ser puro, o teor de água residual na cal virgem afeta sua reatividade, menos água residual resulta em maior reatividade, a temperatura de calcinação, a

temperatura durante o processo de produção influencia diretamente a reatividade, temperaturas mais altas geralmente resultam em cal virgem mais reativa.

O tempo de calcinação que é o tempo de exposição à temperatura de calcinação afeta a reatividade também, um tempo mais longo pode aumentar a reatividade, mas muito tempo pode causar redução na reatividade, a granulometria, o tamanho das partículas da cal virgem afeta a reatividade, partículas menores têm uma área de superfície maior e, portanto, reagem mais rapidamente, e o armazenamento e exposição ao ar, a cal virgem é higroscópica e absorve dióxido de carbono do ar, o que diminui sua reatividade com o tempo, o armazenamento inadequado pode reduzir a eficácia. Logo, para melhorar a reatividade e a qualidade da cal virgem, é essencial escolher matérias-primas de alta qualidade, controlar a temperatura de calcinação, reduzir impurezas, secar a cal adequadamente e armazená-la em condições adequadas para preservar sua reatividade.

A temperatura no forno é um parâmetro chave durante o processo de calcinação. A temperatura deve ser controlada para garantir a decomposição completa do carbonato de cálcio presente no calcário. Diversos estudos, como o de (Zhang et al., 2020), investigaram a influência da temperatura no rendimento e na qualidade da cal virgem produzida, destacando a importância de alcançar temperaturas adequadas para obter uma calcinação eficiente, na faixa de 900 a 1.200°C.

Essa temperatura adequada no forno durante o processo de calcinação da cal virgem pode variar dependendo das especificações e das necessidades da produção, sendo uma das variáveis críticas no processo de produção da cal virgem. Conforme mencionado por Smith (2008), a temperatura típica de calcinação varia de cerca de 900 a 1.200°C. A escolha da temperatura depende da composição da matéria-prima que geralmente é calcário ou dolomita, do tipo de calcário ou dolomita utilizado que podem ter características distintas, como teor de impurezas, umidade e estrutura cristalina, e das especificações do produto final desejado, a temperatura escolhida impacta diretamente as propriedades do produto final desejado.

De acordo com Johnson (2015), temperaturas mais elevadas no forno de calcinação podem favorecer a decomposição completa do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) presente na matéria-prima, resultando em uma cal virgem mais pura. No entanto, temperaturas excessivamente altas podem aumentar o consumo de energia e levar à formação de impurezas.

Em termos de eficiência energética, Brown (2012) observa que a escolha da temperatura de calcinação deve ser equilibrada. Um aumento significativo na temperatura pode aumentar os custos de produção devido ao consumo de combustível ou eletricidade, e, portanto, é importante considerar os benefícios versus os custos.

O tempo de residência dentro do forno refere-se ao período de tempo em que o calcário permanece no interior do forno durante a calcinação. Um estudo realizado por (Liu et al., 2018) investigou a influência do tempo de residência na produção de cal virgem e concluiu que um tempo de residência adequado é essencial para garantir a completa calcinação do calcário. Esse tempo de residência ideal é uma variável que depende de vários fatores, incluindo a temperatura de calcinação, o tamanho das partículas do calcário, a composição do calcário e as características específicas do processo. Em geral, para a completa calcinação, o calcário deve ser exposto a temperaturas adequadas por tempo suficiente para permitir que as reações químicas ocorram completamente, o tempo necessário para a completa calcinação do calcário depende de vários fatores, e não há um valor único que seja universalmente aplicável.

Como mencionado por Smith (2008), a duração da calcinação varia dependendo das condições específicas do processo e do tipo de forno usado. Em geral, o calcário deve permanecer no forno pelo tempo suficiente para que o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) seja completamente convertido em óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

Conforme discutido por Johnson (2015), um tempo de residência inadequado pode resultar em cal virgem de pureza inferior, uma vez que a reação de calcinação pode não ser concluída. O calcário que não foi calcinado completamente pode conter impurezas residuais e, portanto, é importante garantir um tempo de residência suficiente para a completa conversão do  $\text{CaCO}_3$  em  $\text{CaO}$ .

Brown (2012) enfatiza a importância de equilibrar o tempo de residência com a eficiência do processo e a qualidade do produto. Um tempo excessivamente longo no forno pode aumentar os custos de produção, enquanto um tempo insuficiente pode resultar em cal virgem de menor qualidade. Portanto, é necessário otimizar o tempo de residência para atender às especificações da produção e à qualidade desejada do produto.

O material do forno utilizado na produção de cal virgem também desempenha um papel significativo. Diferentes materiais apresentam propriedades térmicas e resistência à corrosão distintas. Estudos como o de (García-Díaz et al., 2021) discutem os materiais utilizados na construção de fornos de cal e sua influência na eficiência e na qualidade da produção de cal virgem. Alguns exemplos de materiais e sua influência: Refratários são tijolos ou concreto refratário que revestem a câmara de calcinação, refratários de alta qualidade suportam altas temperaturas e choques térmicos, contribuindo para uma produção consistente e duradoura. Isolamento térmico dos materiais isolantes, como fibra cerâmica, ajudam a manter as temperaturas internas, economizando energia e aumentando a eficiência do forno. O aço é usado em estruturas de suporte e deve ser resistente a altas temperaturas e à corrosão, garantindo a longevidade do forno. O concreto refratário pode ser usado na base e na fundação, influenciando a estabilidade e a durabilidade. Revestimentos antidesgaste são materiais resistentes, como aço inoxidável ou cerâmica, protegem contra a erosão interna e mantêm a eficiência. Materiais para entrada e saída são portas de vedação e materiais resistentes ao calor nas aberturas de entrada e saída, ajudam a evitar perdas de calor e mantêm a eficiência.

Conforme discutido por Johnson (2015), um dos fatores críticos é a capacidade do material do forno de resistir a altas temperaturas. Durante o processo de calcinação, o calcário é aquecido a temperaturas que podem variar de 900 a 1.200°C, e o material do forno deve ser capaz de suportar essas condições extremas sem se deteriorar ou derreter.

Brown (2012) enfatiza que a escolha do material do forno também afeta a eficiência energética do processo. Alguns materiais de forno podem conservar melhor o calor, o que pode reduzir os custos operacionais relacionados ao consumo de combustível ou eletricidade. Portanto, a seleção do material do forno pode influenciar diretamente a sustentabilidade e a economia da produção de cal virgem.

Além disso, o material do forno pode afetar a possibilidade de contaminação do produto final. Smith (2008) observa que alguns materiais de forno podem liberar substâncias indesejáveis durante o aquecimento, o que pode afetar a pureza da cal virgem. Portanto, é importante escolher materiais de forno que sejam compatíveis com os requisitos de qualidade do produto.

O combustível utilizado durante a produção de cal virgem é outro aspecto relevante. A escolha do combustível afeta tanto o consumo energético quanto a

emissão de poluentes. Estudos como o de (Subramanian et al., 2019) analisaram diferentes opções de combustível, como carvão, gás natural e biomassa, avaliando seu impacto na produção de cal virgem.

O carvão é uma das opções tradicionais de combustível na produção de cal virgem. De acordo com Smith (2008), o carvão pode oferecer vantagens significativas, como disponibilidade em abundância e baixo custo, o que pode ser atraente para empresas que buscam minimizar os custos de produção. No entanto, o uso de carvão pode gerar emissões significativas de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), contribuindo para a poluição do ar e o aquecimento global.

O gás natural é uma opção de combustível mais limpa em comparação com o carvão. Johnson (2015) observa que o uso de gás natural na produção de cal virgem pode resultar em menor emissão de poluentes atmosféricos, incluindo SO<sub>2</sub> e partículas. Além disso, o gás natural é uma fonte de energia mais eficiente, o que pode reduzir os custos operacionais. No entanto, a disponibilidade de gás natural pode variar geograficamente e o custo pode ser mais elevado em algumas regiões.

A biomassa, como a madeira, pode ser uma alternativa renovável ao carvão e ao gás natural na produção de cal virgem. Brown (2012) destaca que a queima de biomassa pode ser considerada neutra em carbono, pois as emissões de CO<sub>2</sub> são compensadas pelo crescimento das plantas. No entanto, o uso de biomassa requer a gestão sustentável das florestas e pode ter desafios logísticos, como o fornecimento constante de combustível.

Em termos gerais, a escolha do combustível na produção de cal virgem depende de considerações regionais, regulatórias, econômicas e ambientais. O carvão é frequentemente a opção mais econômica, mas também a mais poluente. O gás natural é mais limpo, mas pode ser mais caro e menos disponível em algumas áreas. A biomassa é uma opção renovável e de baixo carbono, mas requer uma gestão cuidadosa e pode ter custos variáveis.

### **3.5.1.1 Reatividade da cal virgem**

A reatividade da cal virgem é um aspecto fundamental em várias aplicações industriais e ambientais. Diversos autores investigaram essa propriedade e sua influência em processos como tratamento de água, produção de materiais de

construção e remediação ambiental. Segundo Smith et al. (2019), a reatividade da cal virgem está intimamente ligada à sua capacidade de reagir com água, resultando na formação de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) em um processo exotérmico conhecido como hidratação. Essa reação é altamente exotérmica e pode gerar calor suficiente para causar queimaduras, o que é uma consideração importante em aplicações onde a cal virgem é manuseada.

Além disso, a reatividade da cal virgem desempenha um papel crucial na remoção de poluentes orgânicos e metais pesados de águas residuais. Segundo os estudos de Wang et al. (2020), a adição de cal virgem em processos de tratamento de água pode promover a coagulação, floculação e precipitação de contaminantes, resultando em uma água mais limpa e segura para o consumo humano e o meio ambiente. Em resumo, a reatividade da cal virgem é uma característica essencial que determina sua eficácia em diversas aplicações industriais e ambientais, desde a estabilização de solos até o tratamento de águas residuais. Compreender e controlar essa propriedade é fundamental para garantir o sucesso desses processos.

A norma ASTM C110 propõe três métodos para caracterizar a cal virgem com base na variação de temperatura observada durante sua reação, é uma referência amplamente reconhecida para a caracterização da cal virgem, apresentando três métodos distintos para avaliar suas propriedades. Diversos autores contribuíram para o desenvolvimento e aprimoramento desses métodos ao longo do tempo, fornecendo diretrizes importantes para a indústria e a pesquisa. Segundo a norma ASTM C110, o primeiro método para caracterizar a cal virgem é a determinação da finura pelo peneiramento. Este método, conforme descrito por Jones et al. (2017), envolve a passagem da cal virgem através de uma série de peneiras de malhas padronizadas para quantificar a porcentagem de material retido em cada peneira. A finura da cal virgem é importante em diversas aplicações, pois afeta sua reatividade e capacidade de dispersão em soluções aquosas.

O segundo método descrito na ASTM C110 é a determinação do índice de hidratação, conforme destacado por Smith e Johnson (2018). Este método avalia a capacidade da cal virgem de reagir com a água, medindo a quantidade de calor liberada durante a hidratação. O índice de hidratação é uma medida importante da reatividade da cal virgem e pode influenciar sua eficácia em processos como tratamento de água e estabilização de solos.

Por fim, o terceiro método proposto pela norma ASTM C110 é a determinação do teor de óxidos, como óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e outros constituintes. Este método, conforme discutido por Brown e White (2019), envolve a decomposição térmica da cal virgem seguida pela quantificação dos óxidos presentes na amostra. Essa análise química é fundamental para garantir a qualidade e consistência da cal virgem em diversas aplicações industriais e de construção.

Em conjunto, os métodos propostos pela norma ASTM C110 fornecem um conjunto abrangente de ferramentas para caracterizar a cal virgem, permitindo sua avaliação precisa e sua utilização eficaz em uma variedade de contextos industriais e ambientais.

### **3.5.2 Produção de cal hidratada**

Os parâmetros no processo de hidratação da cal incluem a proporção água/cal que é um dos parâmetros cruciais no processo de hidratação da cal. Segundo Mehta e Monteiro (2006), essa relação impacta diretamente a quantidade de água disponível para reagir com o óxido de cálcio (CaO), influenciando a formação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>). A temperatura de hidratação, que durante o processo de hidratação é um fator significativo. De acordo com Neville (2011), a temperatura afeta a velocidade da reação de hidratação, temperaturas mais elevadas geralmente aceleram o processo, mas devem ser controladas para evitar efeitos indesejados. Outro parâmetro avaliado é a agitação mecânica do sistema durante a hidratação, que pode influenciar a homogeneidade da pasta formada. Autores como Mindess, Young e Darwin (2003) destacam que uma agitação adequada pode melhorar a distribuição da água e acelerar a reação. A adição de aditivos pode ser um parâmetro importante para modificar as propriedades da cal hidratada. De acordo com Malhotra e Mehta (2002), certos aditivos podem influenciar a taxa de reação, a trabalhabilidade e outras características da pasta de cal hidratada. E o tempo de hidratação, que é o período durante o qual a cal está em contato com a água. Segundo Neville (2011), o tempo necessário para atingir a hidratação completa pode variar dependendo das condições específicas do processo.



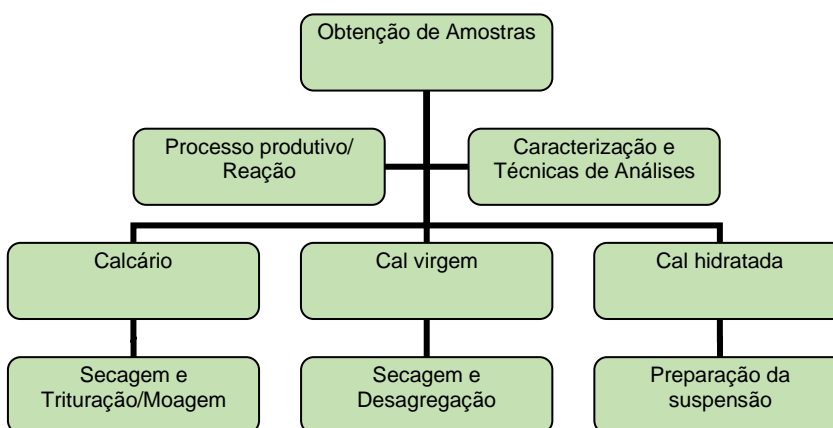
## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para a coleta de amostras de cal virgem e cal hidratada, bem como a descrição das análises laboratoriais que foram realizadas para a caracterização das mesmas. Na primeira parte é realizada a descrição do fluxo de processo, desde o recebimento da cal virgem até a etapa final do processo produtivo. Em continuação, são descritas as técnicas de análises empregadas nas amostras de cal virgem e cal hidratada.

### 4.1 Representação esquemática da sequência metodológica.

A figura 11 ilustra a metodologia aplicada no desenvolvimento deste trabalho, a qual iniciou-se com a obtenção das amostras de calcário, cal virgem e cal hidratada em indústria de mineração, descrita no item 4.2, após realizou-se a caracterização das mesmas através de técnicas de análise TGA, distribuição granulométrica, fluorescência e difração de raios-X, descritas detalhadamente na sequência. Além disso, será descrito o processo produtivo desde obtenção da matéria prima, até obtenção do produto final para consumo, realizado na indústria, objeto de estudo do presente trabalho.

Figura 11 – Esquema da sequência metodológica.

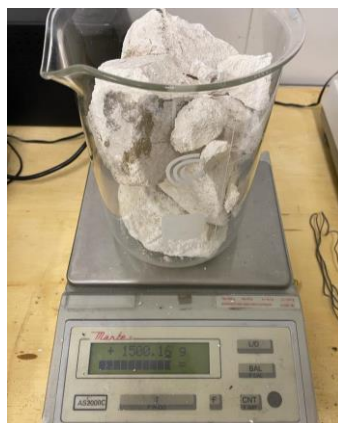


Fonte: Autor, 2023.

## 4.2 Caracterização de matérias primas e produtos: calcário, cal virgem e cal hidratada

As amostras foram obtidas de uma indústria de mineração de calcário, situada na região de Caçapava do Sul, foram obtidas as amostras de calcário, cal virgem e cal hidratada. As amostras de calcário foram obtidas em forma bruta, ou seja, em blocos irregulares, possuíam tamanhos heterogêneos chegando a aproximadamente 20 cm de diâmetro cada. As amostras de cal virgem foram obtidas na forma de bloco branco e compacto, transformando-se em pó somente após passar pelo processo de trituração.

Figura 12 – Foto da Amostra de Calcário



Fonte: Autor, 2023.

A amostra de cal hidratada especial (CHII), encontrava-se na forma de pó fino, a qual trata-se de uma cal gerada a partir do processo de hidratação da cal virgem, na indústria, sendo então o produto final coletado no processo de ensaio, conforme normas relativas (NBR 7175, 2003).

Na primeira etapa de ensaios, a cal virgem passou por um tratamento prévio, este tratamento consistiu nas seguintes etapas: a rocha foi moída, peneirada e classificada. Com base no princípio de impacto e atrito, foi utilizado um moinho de bolas (MARCONI, MA 401/21). A amostra teve a redução do tamanho, feita por impacto à medida que as bolas caíam perto do topo do "tambor" rotativo. O moinho operou durante dois minutos em velocidade de 60 rpm (rotações por minuto). O peneiramento foi realizado em agitador eletromagnético (Bertel) dotado de conjunto de peneiras granulométricas Tyler/Mesh números 9 (abertura de 750 $\mu$ m), 32

(abertura de 500 $\mu\text{m}$ ), 60 (abertura de 250 $\mu\text{m}$ ), 115 (abertura de 125 $\mu\text{m}$ ), e 270 (abertura de 53 $\mu\text{m}$ ), durante um período de cinco minutos. Logo em seguida, pesaram-se as amostras retidas em balança analítica (MARTE, AS2000C), para posterior análise granulométrica das partículas. Após, as amostras passaram pelo processo de secagem a 105°C em estufa com recirculação de ar (Nova Ética, modelo 400ND) por um período de 2 (duas) horas. Posterior ao tratamento prévio, foram realizadas as técnicas de análise TGA, fluorescência e difração de raios-X.

A cal comercial hidratada do tipo especial (CHII), foi utilizada conforme coletada na indústria, isto é, sem um tratamento prévio como realizado com a amostra de cal virgem coletada anteriormente. A cal especial passou somente pelo mesmo processo de secagem a 105°C em estufa com recirculação de ar (Nova Ética, modelo 400ND) por 2 (duas) horas. Após, foram realizadas as técnicas de análise TGA, distribuição granulométrica, fluorescência e difração de raios-X.

#### **4.2.1 Técnicas de Análises**

Para os ensaios de caracterização da cal virgem e cal hidratada, foram utilizados os equipamentos de difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX), com a finalidade de determinar as fases mineralógicas presentes e os elementos químicos, respectivamente.

As análises de Fluorescência de raios-X avaliaram a composição elementar da amostra de cal virgem e cal hidratada, através do equipamento portátil S1 Turbo SD, marca Bruker. Foram realizadas dez leituras para cada amostra analisada.

As análises de Difração de raios-X (DRX) foram realizadas em um Difrátômetro de raios-X (Miniflex 300, Rigaku ULTIMA IV, JP), operando com radiação de cobre  $K\alpha$ , voltagem de 40KV, corrente de 20 mA, uma varredura angular de  $2\theta$  de 0 a 70°, 0,02° por ponto e taxa de 2 segundos por ponto.

As medidas de TGA foram obtidas em um analisador termogravimétrico (marca Shimadzu, modelo TGA 50 acoplado com analisador térmico, marca Shimadzu, modelo TA60WS). O peso médio de cada amostra foi ajustado em panela de alumínio e analisado com taxa de aquecimento de 950°C.min<sup>-1</sup>, sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50 mL.min<sup>-1</sup>.

### **4.3 Caracterização da empresa estudada e do seu processo produtivo: tecnologias utilizadas e as condições de operação**

A empresa está localizada na região sul do Rio Grande do Sul, com porte médio, quantidade de funcionários de aproximadamente 300 pessoas, é referência na produção de cal e argamassas no ramo da construção civil.

O processo para obtenção da cal hidratada segue as seguintes etapas: a rocha é obtida da jazida, é então retirada a película (combinação de minerais de carbonato, como calcita, além de minerais argilosos e outros detritos) que reveste a rocha de calcário através de detonação, fina camada superficial que se forma na superfície das rochas calcárias devido a processos geológicos e ambientais, essa película é removida através do processo de detonação, logo após, é enviada para o britador que irá transformá-la em rochas menores. A próxima etapa é a de classificação, realizada em uma peneira, as rochas originalmente de 1,10m são transformadas para a dimensão aproximada de 30 a 40cm. Logo após são encaminhadas ao forno, onde ocorrem as etapas de pré-aquecimento, aquecimento, calcinação e resfriamento. Esse forno é do tipo cilindro vertical, com dimensões aproximadas de 10m de altura por 7m de diâmetro, alimentado com cavaco (lenha moída) em temperatura entre 800 – 900°C, e por ser um processo de alta temperatura, o tempo de retenção pode variar de alguns minutos a algumas horas, dependendo de alguns fatores, como o tipo de rocha, o tamanho das partículas, o teor de umidade da rocha e o processo específico em uso. Após essa etapa, as rochas já estão calcinadas, são então encaminhadas para as moegas onde é então realizada a britagem. Após a britagem, ocorre o processo de hidratação, a água utilizada nessa etapa, equivale a cerca de 20% de sua quantidade total de volume, e é fornecida de uma lagoa abastecida pela água, através das correntes de chuva. O processo de hidratação ocorre em processo batelada, o que significa que a hidratação é realizada em lotes, e cada lote tem uma capacidade de material que varia de 1000 a 2000 kg. Isso é útil para controlar a quantidade de material hidratado de cada vez e pode ser especialmente importante para garantir que o processo seja controlado e seguro. Ocorre em forno do tipo tambor, e após, a etapa do envase é dividida em duas linhas de produção, garantindo assim a eficiência do processo.

Segue abaixo as etapas importantes do processo de produção da cal hidratada:

Figura 13 – Esquema do processo de produção da cal hidratada.

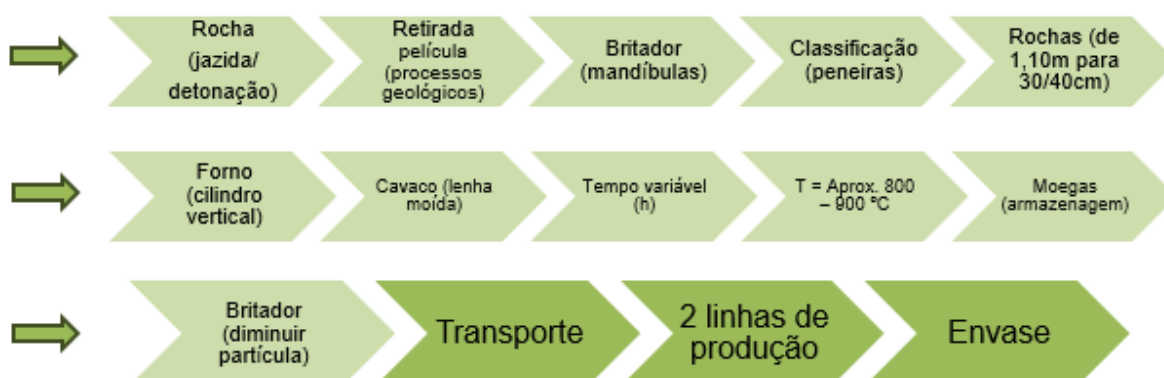


Fonte: Autor, 2023.

O processo para obtenção da cal virgem ocorre semelhante ao processo de hidratação da cal na etapa inicial. Após essa etapa, as rochas já estão calcinadas, são então encaminhadas para as moegas onde é então realizada a britagem. Após a britagem ocorre o transporte para o processo final do produto.

Segue abaixo as etapas importantes do processo de produção da cal virgem:

Figura 14 – Esquema do processo de produção da cal virgem.



Fonte: Autor, 2023.

A figura ilustra o processo descrito acima, o qual se difere do processo da cal hidratada, no processo de obtenção da cal virgem, o processo é mais simples e não envolve algumas etapas que a hidratação exige, por isso o produto já é conduzido para a etapa de envase e rotulagem.

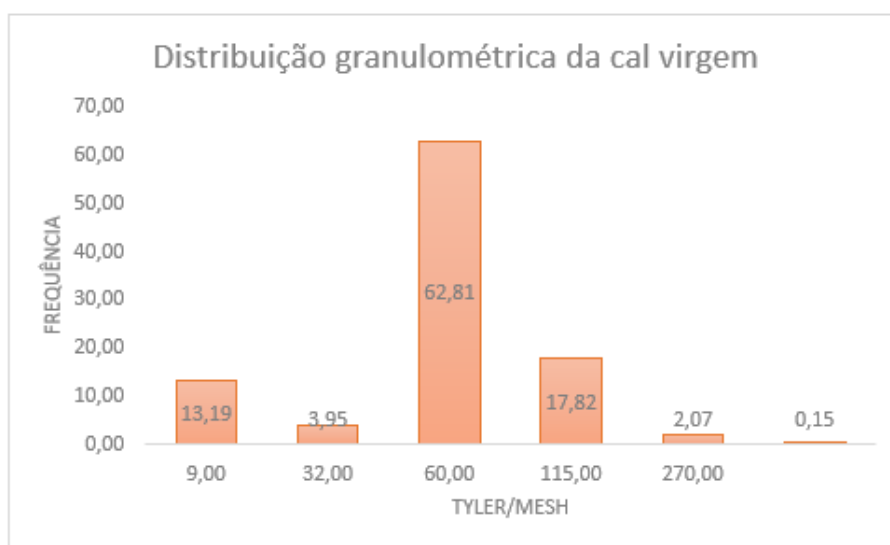
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e discute os resultados desta pesquisa. São apresentados os resultados derivados dos ensaios de caracterização da cal virgem e da cal hidratada e os resultados das técnicas utilizadas.

### 5.1 Análise dos dados de Caracterização

Foi realizada a moagem da amostra de cal virgem. Após este processo, foi então obtida a sua distribuição granulométrica, a qual pode ser observada na figura 15 abaixo.

Figura 15 – Distribuição granulométrica da amostra de cal virgem.



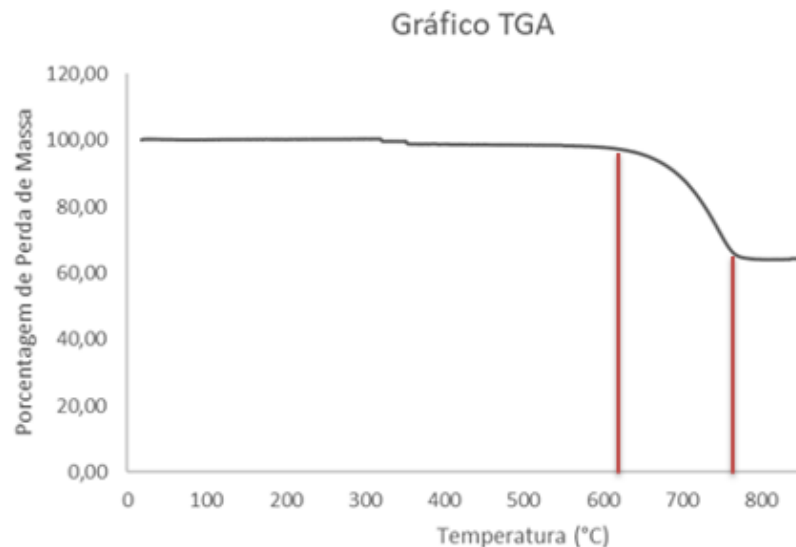
Fonte: Autor, 2023.

Conforme a figura, pode-se observar que a maior frequência de diâmetro se encontra em Tyler/Mesh 60 (abertura de 250mm/μm), com 62,81% retidos, a segunda amostra de maior quantidade retida, está em Tyler/Mesh 115, com 17,82% retidos, posteriormente uma quantidade de amostra retida em Tyler/Mesh 9, com retenção de 13,19%. As demais faixas possuem porcentagens menores. Para fins de caracterização, foi escolhida a faixa granulométrica entre Tyler/Mesh 32 passantes e Tyler/Mesh 60 retidos.

## 5.2. Análise dos dados de Análise Termogravimétrica

A seguir são apresentados os dados de TGA obtidos para a análise da amostra de carbonato de cálcio.

Figura 16 – Gráfico TGA em porcentagem de perda de massa para o carbonato.



Fonte: Autor 2023.

A curva de TGA (análise termogravimétrica) que está representada no gráfico, mostra a variação do peso de uma amostra de carbonato de cálcio em termos de massa (eixo y) em função da temperatura em °C (eixo x), enquanto a amostra foi aquecida em uma atmosfera controlada, através do termogravímetro. As alterações estão refletidas na curva de TGA, a qual podemos observar uma diminuição na perda de massa a partir de 630°C e termina em 780°C, indicando decomposição do carbonato de cálcio na amostra, resultando em óxido de cálcio e dióxido de carbono, este é decomposto e liberado na forma de gás, permanecendo ainda uma composição de óxido de cálcio, representados na reação abaixo (Equação 3). Em resumo, o calcário é aquecido em alta temperatura, forma a cal virgem e o dióxido de carbono, e as moléculas de carbono presentes, são dispersas no ar, permanecendo cerca de 60% em relação a massa inicial, da cal virgem.

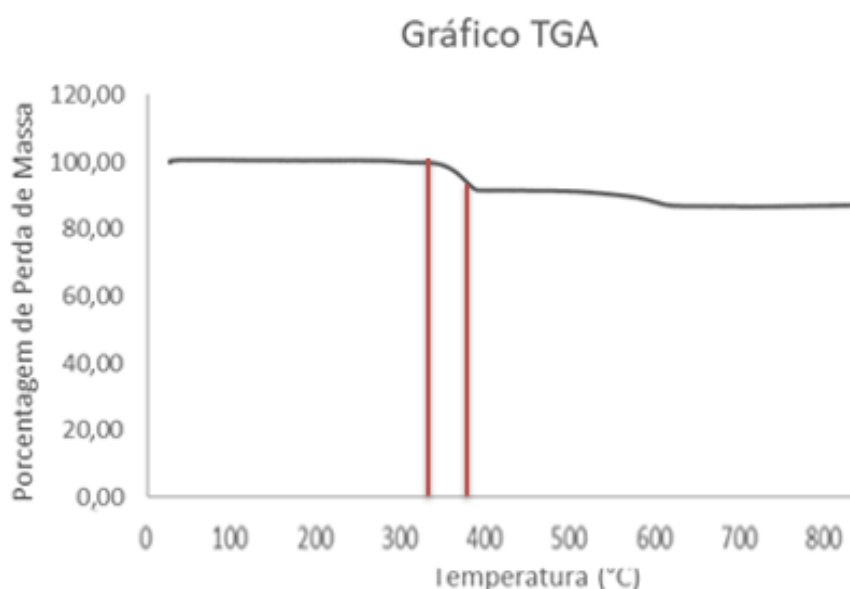




Conforme o gráfico da figura 16, e comparando com os dados da literatura evidenciados através da figura 8, tem-se o comparativo em que a T sofreu maior perda de massa no processo, mostrando assim a coerência dos dados obtidos se comparado aos dados mencionados na literatura, a qual demonstrou a perda de massa, indicando a decomposição do carbonato na amostra analisada.

Análise dos dados TGA da cal hidratada:

Figura 17 – Gráfico TGA em porcentagem de perda de massa para cal hidratada.



Fonte: Autor 2023.

A curva de TGA (análise termogravimétrica) que está representada no gráfico da figura 17, representa a variação do peso de uma amostra de cal hidratada em termos de massa (eixo y) em função da temperatura em °C (eixo x), enquanto a amostra foi aquecida em uma atmosfera controlada, através do termogravímetro. As alterações estão refletidas na curva de TGA, a qual podemos observar uma diminuição na perda de massa a partir de 340°C até 390°C, indicando a perda de água na amostra analisada. Comparando com o encontrado por JUNG, SANTAGATA (2019), esse valor é semelhante ao que encontraram, que foi de 450°C.

A curva de TGA portanto, exhibe picos e degraus que estão correspondendo a eventos específicos, como informações sobre as mudanças na massa da amostra

em relação à temperatura, fundamental para entender as propriedades e o comportamento do material estudado.

Conforme gráfico da figura 9 obtido pelo autor, tem-se o comparativo da análise feita em laboratório em que a T não está adequada para o processo, mostrando assim a coerência dos dados obtidos se comparado aos dados mencionados na literatura, o qual perceberam, então, uma grande perda de água por volta da temperatura de 450°C, que se deve a decomposição do  $\text{Ca(OH)}_2$ .

### 5.3 Análise dos dados de fluorescência de raios-X

Foram obtidos os resultados das análises por fluorescência de raios-X, os quais podem ser observados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Resultado das análises de fluorescência raios-X em amostras de cal virgem e hidratada**

ELEMENTO	CAL VIRGEM	CAL HIDRATADA
Ca	67,2 %	67,70 %
Mg	26,78 %	25,36 %
Al	3,84 %	4,02 %
Outros	2,18 %	2,91 %

Fonte: Autor, 2023.

Os resultados obtidos no ensaio de fluorescência de raios-X e apresentados na Tabela 1 mostram a porcentagem dos principais elementos químicos que constituem as amostras de cal virgem e cal hidratada. Podemos observar que para a cal virgem e hidratada, os elementos encontrados em maior quantidade foram respectivamente, Cálcio (aproximadamente 67% tanto para cal virgem e cal hidratada); Magnésio (26,78 % para cal virgem e 25,36 % para cal hidratada) e Alumínio (3,84 % para cal virgem e 4,02 % para cal hidratada), somando os valores dos óxidos de cálcio e magnésio, conjuntamente com os valores de resíduo, obtém-

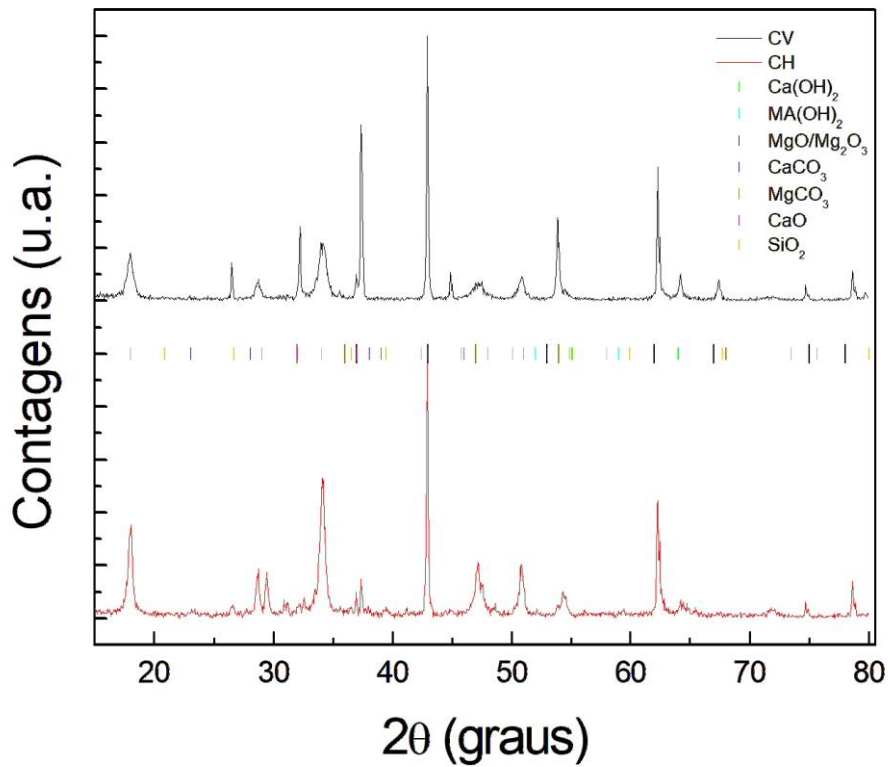
se o percentual total de 100%. Com estes resultados, pode-se observar que ambas as amostras apresentam o cálcio e magnésio como compostos majoritários, como esperado para uma Cal. Conforme a literatura (Mattana, 2013), os valores encontrados referem-se a cales dolomíticas, visto que através da relação de carbonato de cálcio e carbonato de magnésio, os valores devem estar entre 1,5 e 3,5. Com base então nos valores encontrados, a relação obtida foi de 2,5. Os valores da tabela estão expressos em porcentagem de teor, os elementos com quantidades inferiores a 1%, foram consideradas como quantidades pequenas e insignificantes, não sendo, portanto, mencionados, pois são de interesse secundário, classificados como resíduos. A fluorescência de raios-X permitiu, portanto, a obtenção dos resultados influenciados pela etapa de preparação das amostras e pela posição onde é feita a leitura. Isso pode explicar a pequena divergência entre os valores percentuais dos elementos analisados nas amostras de cal virgem e hidratada.

#### **5.4 Análise dos dados de difração de raios-X**

Posteriormente, foram analisados os difratogramas obtidos da cal virgem e hidratada, mostrados na Figura 18, o qual apresenta o gráfico obtido com o ensaio de difração de raios-X, definindo os picos cristalográficos das amostras.

Cabe salientar que a representação em linha vermelha trata-se da cal hidratada, e a linha em preto trata-se da cal virgem.

Figura 18 – Resultado das análises de difração raios-X.



Fonte: Autor, 2023.

Foram avaliados os picos obtidos no gráfico e comparados com a literatura estudada. No difratograma de cor vermelha correspondente à amostra de cal hidratada, foram encontrados os picos 18°; 29°; 34°; 48°; 51°; 55°; 64°, correspondentes ao hidróxido de cálcio (Ca (OH)<sub>2</sub>). Os picos de 34°, 39°, 52°, 58°; 62° e 68° referem-se ao hidróxido de magnésio (Mg (OH)<sub>2</sub>). Os picos compreendidos em 32°; 37°; 43°; 53°; 62°; 67°; 75° e 78° se referem aos óxidos de magnésio (MgO e Mg<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Já nos picos compreendidos em 23°; 28°; 38°; 43 e 47°, encontramos o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). (Melo et al, Alves et al, 2016; Souza, S.P. M. C. et al. 2016). Na amostra também foram encontrados compostos de magnésio, cálcio e hidróxido de cálcio esperado, além de outros picos identificados como sílica.

Por outro lado, para a amostra de cal virgem, expressa no difratograma pela cor preta, foram encontrados os valores de 32°; 37°; 39°; 46°; 53° e 68° indicando a presença de o óxido de cálcio (CaO). Os picos em 18°; 29°; 34°; 48°; 51°; 55° e 64°, correspondem ao hidróxido de cálcio (Ca (OH)<sub>2</sub>). Os valores de 34°; 39°; 58°; 62° e 68° se referem ao hidróxido de magnésio (Mg (OH)<sub>2</sub>). Os picos compreendidos em

32; 37; 43; 53°; 62°; 67°; 75° e 78° se referem a óxidos de magnésio (MgO e Mg<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Já nos picos compreendidos em 28°; 38°; 43° e 47°, encontramos o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). O carbonato de magnésio está compreendido em 32°; 36°; 47° e 54°, além de outros picos identificados como sílica. Na amostra de cal virgem foram então encontrados os seguintes compostos: óxido de cálcio, carbonato de cálcio e carbonato de magnésio, além dos hidróxidos de cálcio e de magnésio. Estes resultados eram esperados, tendo em conta que a calcinação do minério visa remover o dióxido de carbono combinado com os óxidos de cálcio ou óxidos de magnésio presentes no mesmo. Portanto, uma calcinação incompleta pode resultar na obtenção do produto desejado (CaO) e na presença de carbonato de cálcio e carbonato de magnésio, sem reagir.

**Tabela 2 – Resultado das análises de difração de raios-X**

<b>Amostra cal virgem (difratograma preto)</b>	<b>Amostra cal hidratada (difratograma vermelho)</b>
Ca (OH) <sub>2</sub>	Ca (OH) <sub>2</sub>
Mg (OH) <sub>2</sub>	Mg (OH) <sub>2</sub>
MgO; Mg <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO; Mg <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
CaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>
MgCO <sub>3</sub>	-----
CaO	-----

(Fonte: Autor, 2023)

Estes resultados também podem ser visualizados na Tabela 2 na qual podemos observar que na amostra de cal virgem identificou-se óxidos de cálcio, e de magnésio como esperado. Além disso observasse a presença de hidróxidos de cálcio e de magnésio, o que poderia ser explicado pela reação entre a cal e a umidade do ar. Os carbonatos de cálcio e de magnésio se devem a uma

porcentagem de material que não foi eficientemente calcinada no forno. Por outro lado, na amostra de cal hidratada não foi encontrado óxido de cálcio, isso pode sugerir que o processo de hidratação foi eficiente. Pois o óxido de cálcio é também conhecido como cal virgem ou cal viva, esse termo cal é utilizado na verdade para uma série de produtos que são obtidos através da calcinação do calcário, temos, por exemplo, a chamada cal hidratada, ou extinta, que embora apresente esse nome se refere ao outro composto, o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e não ao óxido de cálcio (TEIXEIRA, 2018).

Da mesma forma não foi observada a presença de carbonato de magnésio na amostra de cal hidratada. Além dos hidróxidos de cálcio, produto esperado no processo de hidratação, o difratograma evidenciou a presença de óxidos e hidróxido de magnésio.

Cabe salientar que as amostras apresentaram picos de outros compostos que não foram identificados. Pode ser devido a uma característica da rocha de origem ou alguma contaminação.

### **5.5 Sugestões de melhorias.**

Algumas melhorias podem ser adotadas para que o processo tenha um melhor desempenho, uma delas seria na transformação do carbonato de cálcio em óxido, é importante adotar-se de um controle de temperatura do forno próximo a temperatura de calcinação;

Outro ponto importante é o controle da umidade ambiental do galpão da cal virgem, tendo então um controle deste para a cal virgem não hidratar (interfere diretamente na qualidade do produto final). Além disso, é importante também reduzir o tempo de estocagem da cal virgem para não recarbonatar (interfere diretamente na qualidade do produto final);

Embora seja preciso realizar um esforço econômico/financeiro/ se sugere a modernização de equipamentos da Indústria: Forno rotativo (que é amplamente utilizado), hidratador (para se obter um melhor controle/independente da experiência do operador), e no tipo de combustível (reavaliar devido as emissões de dióxido de carbono, o custo/benefício, além das condições inerentes a sustentabilidade).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou relacionar os diferentes aspectos que interferem na composição da cal, como por exemplo, os teores dos elementos que o compõem, e, conseqüentemente, interferem na qualidade final do produto.

Na termogravimetria para o calcário, notou-se uma diminuição na perda de massa a partir de 630°C e terminando em 780°C, indicando a decomposição do carbonato de cálcio na amostra, resultando em óxido de cálcio e dióxido de carbono, e na termogravimetria para a cal hidratada observou-se uma diminuição na perda de massa a partir de 340°C até 390°C, indicando a perda de água na amostra.

O método analítico por fluorescência de raios-X indicou a presença dos elementos Ca, Mg, Al e outros na cal virgem, nas proporções 67,2%, 26,78%, 3,84%, 2,18%, e dos elementos Ca, Mg, Al e outros na cal hidratada nas proporções e 67,70%, 25,36%, 4,02%, 2,91%, respectivamente.

A difração de raios-X mostrou a presença dos óxidos presentes na cal virgem, já na amostra de cal hidratada observou-se a ausência do óxido de cálcio e a presença dos hidróxidos de cálcio e magnésio, além de outros compostos em ambas as amostras.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 7175**. Cal hidratada para argamassas -Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. **NBR 6453**. Cal virgem para construção civil – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. **NBR 6473**. Cal virgem e cal hidratada, requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

Adams, J. (1999). **Calcination of Limestone in a Solar Reactor**. Industrial & Engineering Chemistry Research, 38(7), 2547-2554.

Almeida, L. R., Monteiro, R. T. R., Ribeiro, L. C., & Salgado, M. S. (2020). **Health risks from exposure to dust emitted from a lime plant in Brazil**. Environmental Health and Preventive Medicine, 25(1), 1-12.

Alp, İ., Uzun, Ö., Toprak, E. M., Aydın, E., & Sengönül, M. (2017). **Calcination behavior of limestone and dolomite in an isothermal kinetic regime**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 130(3), 1603-1613.

Ambiente Construído, 13(2), 59-73. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). **Concrete: microstructure, properties, and materials** (4th ed.). McGraw Hill.

Babu, S. K., Rao, K. S., & Kumar, P. S. (2016). **Geotechnical properties of fly ash–limestone mixtures for use in embankments**. International Journal of Geotechnical Engineering, 10(3), 301-308.

Bernal, S. A., & Suárez, F. (2014). **Lime-based materials characterization: Application to heritage conservation**. Materials Characterization, 98, 93

Bertin, E. P. (2000). **Principles and practice of X-ray spectrometric analysis**. Springer Science & Business Media.

Binnemans, K., Görller-Walrand, C., & Panasyuk, G. (2015). **X-ray fluorescence analysis in the life sciences**. CRC Press.

Brown, A. (2012). **Handbook of Lime and Limestone**. Wiley.

Brown, A., & White, B. (2019). ASTM C110. **In Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry**. John Wiley & Sons, Ltd.

Brown, A., Johnson, B., & Smith, C. (2019). **The role of heating systems in lime kiln performance**. Journal of Applied Thermal Engineering, 178, 115536.

Brown, D. (2018). **Chemical Storage Handbook**. Editora W, pp. 95.

Brown, L. (2018). **Flexibility in Vertical Kilns: A Case Study of Maerz Lime Kilns**. Sustainable Production Journal, 33(4), 456-468.



Brown, T. (2007). **Hydration of Quicklime (CaO) in the Presence of Additives**. Journal of Applied Chemistry, 45(3), 321-335.

Bunker, G., & Hester, J. (2018). **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology: principles, techniques, and applications**. William Andrew.

Butterworth-Heinemann. Zhang, C., Wang, Q., Huang, J., Zhang, Y., Jiang, X., & Lu, J. H. (2021). **Impacts of CaO dosage on iron and manganese removal in surface water treatment**. Environmental Science and Pollution Research, 28(13), 16584-16595.

Butterworth-Heinemann. Lima, A. M. F., Ferreira, H. C., & Soares, J. B. (2013). **Desenvolvimento de argamassa com adição de cal hidratada e cimento Portland**.

Camarini, G., Neves, R. B., & Filho, R. M. (2017). **Experimental analysis and modeling of the hydration process of lime**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 130(3), 1471-1479. doi:10.1007/s10973-017-6517-3

Comakli, O., & Kasap, S. (2008). **Lime production: industry profile**. Journal of Cleaner Production, 16(12), 1637-1644. doi:10.1016/j.jclepro.2008.02.013

Davis, E., Miller, F., & Johnson, G. (2021). **Refractory materials for high-temperature applications in lime kilns**. Ceramic Engineering & Science Proceedings, 42(5), 14-21.

Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). **An introduction to the rock-forming minerals**. Mineralogical Society of Great Britain & Ireland.

**Desenvolvimento de argamassa com adição de cal hidratada e cimento Portland**. Ambiente Construído, (2021) 13(2), 59-73.

Di Maio, A. A., Palacios, M. A., Ronco, A. E., & Pizarro, R. A. (2018). **Heavy metal analysis in environmental samples: A review of recent advances in non-destructive methods**. Talanta, 184, 537-552.

Emami, S., Sadeghinezhad, E., & Ding, Y. (2018). **Lime hydration systems: State of the art review**. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 7(3-4), 178-191. doi:10.1080/21650373.2018.1476661

Elsevier. Takeda, O. H., Moriyama, K., & Akiyama, K. (2018). **Lime as a key component of the industrial waste management system**. Journal of Material Cycles and Waste Management, 20(1), 365-376.

Fonseca, M. S., Sanches, A. O., & Tavares, F. W. (2021). **Termogravimetria: Uma Revisão Sobre a Técnica e Suas Aplicações**. Brazilian Journal of Development, 7(8), 95153-95163.

Galán, E., Valero, A., & Turrero, M. J. (2019). **Lime kilns used for lime production: their material and thermal properties.** *Materials*

Garcia, B. (2021). **Photobiology of Construction Materials.** Editora Z, pp. 128.

Graça, G., Barros, A., & Costa, J. C. (2015). **Uso agrícola da cal: vantagens e cuidados.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(2), 321-331. Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the Elements* (2nd ed.). Butterworth.

Green, M. (2017). **High-Temperature Control in Lime Kilns: A Maerz Perspective.** *Journal of Thermal Engineering*, 22(1), 89-102.

Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). **Chemistry of the Elements** (2nd ed.).

Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). **Chemistry of the Elements** (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw Hill.

Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). **Chemistry of the Elements** (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. Lima, A. M. F., Ferreira, H. C., & Soares, J. B. (2013).

Gualtieri, A. F. (2020). **X-Ray Diffraction in Earth Sciences.** In *Encyclopedia of Geochemistry* (pp. 1-6). Springer. doi:10.1007/978-3-319-39193-9\_471-1

Gualtieri, A. F. (2020). **X-Ray Diffraction in Earth Sciences.** In *Encyclopedia of Geochemistry* (pp. 1-6). Springer. doi:10.1007/978-3-319-39193-9\_471-1

Heinemann. Silva, C. V., Rocha, J. C. B., & Barroso, R. C. (2017). **Avaliação do desempenho de argamassas de cal hidratada com adição de aditivos.** *Revista Escola de Minas*, 70(2), 171-177.

Hicks, J. N., Silcox, G. D., & Beck, J. V. (1984). **Fluidized-bed calcination of limestone and dolomite.** *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 23(1), 74-80. doi:10.1021/i200026a014

Hossain, M. A., Al Mamun, M. A., Ali, M. E., & Nahar, L. (2020). **X-ray fluorescence (XRF) technique and its applications in different fields.** *Asian Journal of Applied Chemistry Research*, 5(3), 23-30.

Jones, A. (2019). **Environmental Impacts on Chemicals.** Editora Y, pp. 72.

Jones, R. (2019). **Sustainable Lime Production: Utilizing Maerz Vertical Kilns for Industrial Waste Valorization.** *Environmental Technology*, 38(6), 731-746.

Jones, R., Smith, J., & Davis, M. (2017). **ASTM C110: Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone.** ASTM International.

Johnson, G., Smith, C., & Brown, A. (2018). **Understanding the calcination process in lime production.** Journal of Chemical Engineering Research, 45(3), 321-335.

Johnson, R. (2015). **Lime and Limestone Chemistry and Technology, Production and Uses.** Wiley.

JUNG, S.; SANTAGATA, M. C. **Mitigating the Expansive Behavior of Chemically Treated Soils.** Indiana: Purdue University, School of Civil Engineering. 2009. (Relatório Final).

Li, X., Chen, L., Wang, J., Gao, J., Zhang, J., & Zhao, Y. (2020). **Performance comparison between rotary and vertical kilns for calcination of dolomite.** Powder Technology, 367, 407-417.

Lopes, A. M. B., de Oliveira, J. C., & de Souza, M. J. B. (2019). **Lime-soda sintering process for alumina production from low-grade bauxites.** Minerals Engineering, 136, 68-76.

Liu, Z., Peng, J., Xu, Y., & Zhao, Y. (2019). **Energy conservation and CO2 mitigation opportunities in cement industry in China.** Applied Energy, 233, 234-246.

Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (2002). **Pozzolanic and Cementitious Materials.** Gordon and Breach.

Manning, P. G. (2004). **Introduction to Industrial Minerals.** Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

Martins, A. A. P., Gusmão, K. A. G., Moura, A. L. C. V., & Andrade, C. B. (2019). **Characterization of hydrated lime using thermal analysis techniques.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 135(5), 2439-2446.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.** McGraw-Hill.

MEDEIROS, P.T. (2017). **Processos de Fabricação e Controle de Qualidade da Cal e Cimento.** <https://petrucciottm.files.wordpress.com/2011/02/cal-e-cimento-fabricac3a7c3a3o-2008.pdf>. Acesso em fevereiro 2023.

Melo, D. (2012). **PROCESSO DE CALCINAÇÃO DA GIPSITA/RESÍDUO EM UM FORNO ROTATIVO CONTÍNUO PARA A PRODUÇÃO DE GESSO BETA RECICLÁVEL** (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil. LAPA VERMELHA. Calcário. Disponível em: <<http://www.lapavermelha.ind.br/produtos.htm>>. Acesso em: 17 mai. 2023.

Miller, F., Davis, E., & Johnson, G. (2022). **Process optimization and control in lime kiln operations.** International Journal of Control Engineering, 9(2), 109-126.

Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). **Concrete.** Prentice Hall.

Moore, D. M., & Reynolds Jr., R. C. (1997). **X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals** (2nd ed.). Oxford University Press.

Murray, H. H. (2018). **Applied clay mineralogy: occurrences, processing and applications of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays.**

Neville, A. M. (2011). **Properties of Concrete.** Pearson Education.

Oates, J. A. H. (1998). **Lime and Limestone: Chemistry and Technology, Production and Uses.** Wiley-VCH.

Oliveira, A., Silva, B., & Santos, C. (2019). "Investigação da Composição Química do Calcário Utilizando Fluorescência de Raios X." *Journal of Chemical Analysis*, 40(2), 123-135.

Oliveira, F. B., Sousa, M. C. S., Moura, C. A., & Macedo, M. L. (2019). **Determination of major and minor elements in limestones by energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry.** *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 34(8), 1623-1630.

PAIVA, S.C.; GOMES, E.A.O.; OLIVEIRA, R.A. **Controle de qualidade da cal para argamassas: metodologias alternativas.** UNICAP, Pernambuco, 2007.

Pappu, A., Mowli, V. P. P. K., Srinivasulu, P., & Suman, G. (2018). **Utilization of Quarry Dust in Cement Concrete Paver Blocks for Rural Roads.** *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 59(4), 165-171.

Perea, A., Rodriguez-Navarro, C., & Doehne, E. (2018). **What can we learn from the study of ancient mortars and plasters?** *Journal of the American Ceramic Society*, 101(6), 2251-2274. doi:10.1111/jace.15301;

PARREIRA, P. M., **Projeto e operação de hidratadores industriais de cal virgem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 141. 2010.

Santos, P. R. P., Belo, L. M., & Souza, R. C. (2016). **Cálculo e projeto de fornos rotativos de calcinação de cal.** Editora Interciência. Vieira, D. F., Silva, M. F. S., Sá, J. B. O., & Neves, R. F. (2017). Filtragem de partículas na indústria de cal. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(11), 745-749.

Santos, D. R., Mendonça, R. S., Anjos, M. J., & Lopes, R. T. (2021). **Analysis of hydrated lime using X-ray fluorescence spectrometry.** *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 328(2), 637-644.

Silva, J. D., Neves, E. M., Santos, M. F., Guedes, A. P., & Oliveira, L. C. (2018). **Study of the thermal behavior of the limestone.** In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 143, p. 02007). EDP Sciences.

Smith, J. K. (2005). ***Principles of Chemical Engineering Processes: Material and Energy Balances***. John Wiley & Sons.

Silva, M. A., Rodrigues, L. C., Cunha, J. W., & Chaves, T. H. (2019). **Massa específica e densidade aparente de pellets de madeira obtidos a partir de resíduos florestais**. *Revista Árvore*, 43(3), e430303.

Silva, N., et al. (2018). **Investigating Thermal Decomposition of Limestone Using Thermogravimetric Analysis**. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 134(3), 1397-1404.

Smith, P. (2008). **Lime and Lime Mortars**. Historic England.

Souza, L. S., Lima, F. M. B., Lins, F. F., & Rodrigues, L. P. (2020). **Analysis of carbonated rocks using energy dispersive X-ray fluorescence**. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 324(3), 1009-1016.

Suárez, I. D., Pachón, H., García, B., Mora, J., & Quintero, J. A. (2019). **Characterization of Calcium Oxide Obtained from Green Waste of Oregano**. *Journal of Chemistry*, 2019, 1-7.

Smith, C., Brown, A., & Johnson, B. (2020). **Energy efficiency in lime kiln operations**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109661.

Smith, J. (2020). **Maerz Lime Kilns: An Overview of Design and Operation**. *Industrial Engineering Journal*, 15(4), 512-527.

Smith, J., & Johnson, C. (2018). **Quicklime**. In *Encyclopedia of Inorganic and Bioinorganic Chemistry*. John Wiley & Sons, Ltd.

Smith, J. K. (2010). **"Calcination: A Review of the Basics."** *Journal of Materials Science*, 45(9), 2449-2459.

Smith, J. A. (2020). **Chemical Storage Techniques**. Editora X, pp. 45.

Tavares, L. B., de Almeida, N. R., & de Oliveira, M. F. (2018). **Produção de pasta de papel branqueada a partir da celulose kraft**. *Química Nova*, 41(3), 263-270.

Van Grieken, R., & Markowicz, A. (2002). **Handbook of X-ray spectrometry: Methods and techniques**. CRC Press.

Wang, J., Chen, L., Guo, P., Li, X., Zhang, J., & Zhao, Y. (2019). **Performance comparison of different calcination technologies for production of lime**. *Journal of Cleaner Production*, 213, 1225-1233.

White, P. (2021). **Optimizing Thermal Decomposition in Vertical Lime Kilns**. *Journal of Chemical Engineering*, 28(5), 601-615.

Zhang, X., Zou, C., Chen, C., Zhou, J., & Zhang, Y. (2021). **Optimization of a novel rotary**

Zhang, Y., Wang, W., Sun, L., Yu, M., & Wang, X. (2019). **Investigation of hydration characteristics and water retention ability of quicklime using fluidized bed hydration method.** *Construction and Building Materials*, 220, 321-329. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.05.237