

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Flávia Sapper da Rosa**

**ANÁLISE TÉRMICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE CAL**

**Santa Maria, RS**

**2019**

**Flávia Sapper da Rosa**

**ANÁLISE TÉRMICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE CAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre Engenharia de Produção**.

Orientador: Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano

Santa Maria, RS

2019

Da Rosa, Flávia  
ANÁLISE TÉRMICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE CAL /  
Flávia Da Rosa.- 2019.  
49 p.; 30 cm

Orientador: Nattan Roberto Caetano  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção, RS, 2019

1. Calcinação 2. Lenha 3. Cal I. Roberto Caetano,  
Nattan II. Título.

**FLÁVIA SAPPER DA ROSA**

**ANÁLISE TÉRMICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE CAL**

Projeto de dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre Engenharia de Produção**.

**Aprovado em 24 de junho de 2019:**

---

**Nattan Roberto Caetano, Dr. (UFSM)**

(Presidente/Orientador)

---

**Thompson D. M. Lanza Nova, Dr. (UFSM)**

---

**Pedro Daniel da Cunha Kemerich, Dr. (UNIPAMPA)**

Santa Maria, RS

2019

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, sem a permissão dele nada disso seria possível;

A minha família, que compreendeu os momentos de ausência e sempre me apoiaram a não desistir. Minha mãe e meu namorado, muito obrigada por toda a paciência e apoio, sem vocês eu não teria conseguido;

Ao Prof. Dr. Nattan, muito obrigada pela paciência e persistência que teve ao longo do desenvolvimento da dissertação;

A coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, ao Prof. Dr. Júlio Mairesse Siluk, muito obrigada por todo o apoio e suporte;

Enfim, muito obrigada a todos que de uma maneira ou de outra se fizeram presente nesta longa e árdua caminhada, a todos que permitiram que este sonho se tornasse uma realidade.

## **RESUMO**

### **ANÁLISE TÉRMICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE CAL**

**AUTOR:** Flávia Sapper da Rosa  
**ORIENTADOR:** Nattan Roberto Caetano

Empresas do ramo da mineração possuem alto rendimento, porém, os processos de produção empregam pouca tecnologia. A lenha é uma fonte de energia frequentemente utilizada devido ao simples armazenamento, custo baixo, alta disponibilidade na região e não requer processamento. Portanto, o presente trabalho tem por objetivo analisar o consumo de lenha como combustível e promover a otimização do processo para a produção da cal em termos de aproveitamento de matéria prima e custos. O forno analisado neste trabalho foi o do tipo barranco contínuo, o qual utiliza a lenha em toras como combustível. Além disso, este trabalho visa avaliar os níveis de temperatura aos quais o operador está exposto, considerando a norma NR 15. Foi observado que se a quantidade de combustível aumentar o tempo de cozimento conseqüentemente diminui em até 20%. Isto aumenta a quantidade de cal produzida por batelada aumentando assim os lucros para a empresa.

Palavras-chave: Calcinação. Cal. Lenha.

## **ABSTRACT**

### **THERMAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF THE LIME PRODUCTION**

**AUTHOR: FLÁVIA SAPPER DA ROSA  
ADVISOR: NATTAN ROBERTO CAETANO**

Mining companies have high yields, however, production processes employ low technology. Firewood is a frequently used energy source due to simple storage, low cost, high availability in the region and requires no processing. Therefore, the present work has the aim of analyzing the fuel consumption and possible improvements in the production process of lime in terms of use of raw material and costs. The furnace analyzed in this work was the continuous ravine type, which uses logs of firewood as fuel. In addition, this work aims to evaluate the temperature levels to which the operator is exposed, considering the norm NR 15. It was observed that, if the amount of fuel increases consequently the processing time decreases by up to 20%. This increases the amount of lime produced per batch thereby increasing profits for the company.

**Keywords: Calcination. Energy Efficiency. High temperatures.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Energia e emissão de CO <sub>2</sub> segundo tipos de cal e fornos - resultante de levantamento de referências nacionais e empresas.....	27
Figura 2 - Imagem do forno da empresa .....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipo de atividade .....	32
Tabela 2 - Limites de tolerância .....	33
Tabela 3 - Regime de trabalho intermitente com descanso no próprio local de trabalho (por hora .....	34
Tabela 4 - Cenário atual e cenário projetado da empresa analisada .....	41
Tabela 5 - Custos Fixos referentes ao forno da empresa.....	43
Tabela 6 - Produção versus ganho. ....	43
Tabela 7 - Análises das temperaturas.....	44
Tabela 8 - Análises das temperaturas 2.....	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - RS
IBUTG	Índice de Bulbo Úmido – Termômetro de Globo
NBR	Norma Brasileira regulamentadora
TBN	Temperatura de bulbo úmido natural
TBS	Temperatura de bulbo seco
TG	Temperatura de globo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1	QUALIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	14
1.2	OBJETIVOS .....	15
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>15</b>
1.3	JUSTIFICATIVA .....	15
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>17</b>
2.1	A CAL .....	17
2.2	FORNOS .....	20
2.3	CARACTERIZAÇÃO DO COMBUSTIVEL UTILIZADO .....	22
<b>2.3.1</b>	<b>Composição química da madeira</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Decomposição térmica da madeira</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Transporte da lenha.</b> .....	<b>23</b>
2.4	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA .....	24
<b>2.4.1</b>	<b>Combustão</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Reação de combustão da cal.</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Emissões geradas</b> .....	<b>26</b>
2.5	INFLUÊNCIA DO CALOR NO OPERADOR .....	30
<b>2.5.1</b>	<b>NR 15 - Atividades e operações insalubres - anexo II limites de tolerância para exposição ao calor</b> .....	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	35
3.2	LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	35
3.3	ANÁLISE DAS INFORMAÇÕES .....	38
<b>3.3.1</b>	<b>Consumo de lenha</b> .....	<b>38</b>
3.4	ANÁLISE DO BEM ESTAR DO TRABALHADOR ENVOLVIDO DIRETAMENTE NO PROCESSO.....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>40</b>
4.1	CONSUMO DE LENHA.....	40
4.2	ANÁLISE DOS CUSTOS ENVOLVIDOS .....	41
4.3	ANÁLISE DO BEM-ESTAR DO TRABALHADOR ENVOLVIDO DIRETAMENTE NO PROCESSO.....	42
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>44</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	44
5.2	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....	45
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Entre os mais diferentes produtos derivados de fontes minerais, a cal é considerada um dos de maior expressão no mercado, em termos de volume consumido e utilidade. É produzida a partir da decomposição térmica dos carbonatos de cálcio e de magnésio obtidos de depósitos de calcário. Depois de ser extraído, passa por um processo de calcinação, retirando o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que aparece combinado com os óxidos de cálcio ( $\text{CaO}$ ) ou magnésio ( $\text{MgO}$ ), em fornos que trabalham em temperaturas entre  $900^\circ$  e  $1200^\circ\text{C}$  (JOHN et al., 2014).

No cenário atual de variações no mercado em que as organizações estão inseridas, tais como, concorrência, elevação no preço dos recursos energéticos, competitividade, bem como a busca pela sustentabilidade, tem levado muitas empresas a buscarem ferramentas que levem a eficiência do uso de seus recursos. As empresas dos países em desenvolvimento estão no progresso para as avançadas tecnologias, sendo que o empenho para diminuir os custos e o impacto ambiental da produção de cal geralmente abrangem a inclusão de instrumentos e equipamentos mais novos, e também, implicam no uso de controle automático de diversos parâmetros de operação (SILVA, 2009).

O uso das várias fontes de energia e o desenvolvimento tecnológico transformaram as sociedades modernas, modificando a qualidade de vida das pessoas. A exploração energética proporcionou o aumento da produtividade econômica, assim como trouxe novas formas de bem-estar para a população (GOLDEMBERG et al., 2005).

Uma condição para o funcionamento dos fornos de calcinação da cal, está relacionada com o combustível, sendo que na área analisada utiliza-se// a madeira. Entre os materiais de origem biológica, a madeira é a mais usada, o lenho de uma árvore contém uma quantidade de substâncias que são utilizadas como matérias primas em quase todos os ramos da tecnologia. A madeira possui, poder calorífico entre 2.250 a 2.700 Kcal/Kg, deve-se considerar também que a umidade presente neste tipo de combustível é responsável pela variação térmica que, sem o monitoramento correto, prejudica a operação, levando a gastos desnecessários com combustíveis, calor excessivo emitido pelo fogo e poluição do meio ambiente. No Brasil, a lenha é o segundo combustível mais usual para a cocção (IBGE, 2018a).

A utilização da madeira para o fim energético apesar de ser uma prática das mais antigas da humanidade tem novamente despertado o interesse dos pesquisadores. Esse fato vem em consequência principalmente da crise energética que vem afligindo o mundo, e a madeira tem sido considerada como um recurso em potencial para o atendimento das necessidades

energéticas futuras. As principais espécies cultivadas no Brasil para uso energético pertencem ao gênero *Eucalyptus*.

Sabendo-se da importância da madeira, torna-se necessário o conhecimento de suas características, sendo possível, assim, concluir sobre a qualidade do produto final, ou seja, as características de um determinado produto estão diretamente relacionadas com a qualidade da madeira de origem.

Os operadores dos fornos estão expostos a altas temperaturas diariamente, isso pode levar a danos a sua saúde, levando até mesmo a perdas no seu rendimento no trabalho e por consequência, maior probabilidade na ocorrência de acidentes de trabalho. O que se pode constatar de acordo com observações, é que o calor é um risco presente nas atividades analisadas e que merece tratamento pelo risco que pode apresentar para aqueles que a ele se expõem. O calor pode vir a prejudicar a saúde do operador, por isso a atenção sempre a temperatura, se a mesma encontrasse adequada para a execução da atividade.

A partir de um estudo de campo foi verificada a necessidade da empresa localizada no município de Caçapava do Sul, em melhorar o rendimento do combustível utilizado no forno da cal, pois o mesmo gera gastos excessivos para a empresa. A empresa considera as condições financeiras e bem-estar dos trabalhadores fundamentais para aumentar sua capacidade produtiva e obter ganhos na produção. A partir do estudo dos dados da empresa, como a quantidade de matéria primas (rocha calcária), combustível utilizado, a quantidade de lenha e quanto de cal virgem foi produzido, busca-se propor melhorias na utilização do combustível para assim oferecer um rendimento superior sem influenciar na energia desprendida no processo de fabricação da cal. A análise de temperatura também foi realizada.

Neste sentido, o presente trabalho propõe analisar o consumo da lenha no processo produtivo da cal e análise da temperatura que o operador encontrasse exposto.

Foram realizadas análises quantitativas de calor com o medidor de stress térmico Tgd 400 *Instrutherm* e os diferentes resultados encontrados foram comparados com os limites de tolerância estabelecidos pela Norma Regulamentadora NR 15, anexo III. Desta forma, se faz necessário medidas corretivas e preventivas visando contribuir para a segurança e o bem-estar dos funcionários. São apresentadas algumas sugestões para proporcionar um local de trabalho onde os agentes de riscos são controlados, colaborando com a saúde dos funcionários, podendo também servir de base para futuros estudos para empresas que atuam neste segmento.

## 1.1 QUALIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Empresas do ramo da mineração possuem alto rendimento, mas ainda, estão inseridas em um meio de produção bruto e que dispõe de pouca tecnologia atrelada para uma manufatura final. Neste setor há muitos processos que necessitam de inovação, para que o beneficiamento passe a priorizar o meio social e ambiental existente. As questões sociais exigem atenção e envolvimento para que recebam tratamento adequado dentro das leis previstas. A preocupação com o bem-estar do funcionário ainda é recente no meio da mineração.

Em um mercado tão competitivo e com a necessidade da utilização dos recursos dentro da organização, os desperdícios são inaceitáveis para as empresas que buscam bons resultados em seus processos. No ramo da mineração do carbonato de cálcio, as indústrias se deparam diariamente com desperdícios, e isto torna-se um desafio quando se trata da redução dos custos e melhorias sustentáveis, as quais visam a diminuição de gases poluentes ao meio ambiente e otimização do processo produtivo. Por esta razão, a necessidade de melhorias internas e de processos são constantes neste tipo de indústria, sendo uma característica do ramo minerador (DALLAROSA, 2011).

Considerando então, a falta de tecnologia aplicada ao processo de produção da cal, de grande parte das empresas, o resultado é que essas operem com baixa eficiência, com um alto consumo de combustível e grandes emissões de CO<sub>2</sub>. Assim, há um grande comprometimento na efetividade do processo, bem como na geração de renda, recursos e produto final.

A cal virgem teve uma produção no Brasil de 7,4 milhões de toneladas. A quantidade de calcário empregada na fabricação de cal, em 2007, pode ser estimada em perto de 14,8 milhões de toneladas, ou seja, pouco mais de 14% da produção de calcário no Brasil. (SILVA, 2009). As indústrias de cal correspondem um importante papel no desenvolvimento dos países, não só pela abundância de sua utilização na economia, mas também pelas suas características e pela rigidez locacional das jazidas, gerando assim empregos e estimulando a economia.

Todo o qualquer tipo de beneficiamento minerador, deve considerar os impactos ambientais, os quais são alterações do meio ambiente pelas atividades antrópicas, que podem ter conotação positiva ou negativa (SANCHEZ, 2008). Na legislação brasileira a Resolução Conama 01/86 (BRASIL, 1986) focaliza que impacto ambiental é alguma alteração das propriedades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente, originada por qualquer forma de matéria ou energia, resultante das atividades humanas, que direta ou indiretamente afetem: à saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente. Na maioria das vezes as atividades de

mineração são as grandes causadoras desses impactos, pois no processo de calcinação ocorre a queima da madeira e conseqüentemente, liberação de gases que possam a vir a prejudicar o meio ambiente.

A exposição ao calor é um risco que se faz presente diariamente na rotina de um operador de fornos de calcinação e faz com que se tenha mais cuidado pelos danos que pode causar. Além da exposição ao calor, outros riscos, como superaquecimento no ambiente do trabalho e explosões, estão associados à operação de fornos. Pensando na melhoria do bem-estar dos funcionários que trabalham neste setor da empresa, são realizadas algumas melhorias para o forno avaliado.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo analisar o consumo do combustível utilizado e matéria prima para a produção da cal um forno de calcinação em termos de aproveitamento de matéria prima e custos.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para garantir que o objetivo geral do trabalho seja alcançado, o estudo tem os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar o processamento da matéria prima;
- b) Realizar uma análise econômica dos custos envolvidos no processo;
- c) Propor alterações no processo visando a otimização;
- d) Analisar os riscos ocupacionais à que os funcionários estão expostos.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

A cal é um produto fundamental à atividade econômica da maioria dos países e é utilizada a nível mundial nos mais variados setores. A construção civil, agricultura, indústria alimentar, indústria papelreira e farmacêutica, indústria vidreira, indústria metalúrgica, indústria cimenteira, o tratamento de gases de combustão, entre outros são setores que utilizam a cal como produto para desenvolvimento de suas atividades. A principal necessidade da empresa

analisada no ponto de vista energético é a redução no consumo do combustível utilizado, otimizando assim a produção.

O processo de fabricação de cal virgem é um pouco complicado levando em consideração à utilização de diferentes tipos de combustíveis. As fontes de combustíveis têm influência sob a qualidade do produto e sobre os custos de fabricação, assim a escolha do combustível deve ser criteriosamente delineada.

A decisão da fonte a ser utilizada tem importância e influência nos resultados de um modo geral. Custos mais baixos com a produção e quase nenhuma taxa de emissão de poluentes, é o que as empresas buscam para otimização do processo produtivo e aumento do seu faturamento. Através dos dados obtidos pela pesquisa, por mês, o forno necessita em média 1800 a 2500 toneladas de lenha.

A abordagem do tema proporciona uma oportunidade de pesquisa, para a apresentação de um trabalho de conscientização, no que diz respeito à conservação e uso da energia, agregado ao incentivo em estudo e pesquisa, para busca de nova fonte geradora de energia renovável, sustentável, limpa, segura e ambientalmente correta, que implicará seguramente em desenvolvimento social, econômico e tecnológico em todo o país.

É importante ressaltar que os impactos ambientais gerados também são uma preocupação mais recente, em vista do tempo de exploração do calcário. Os danos ambientais da produção de cal podem-se estender em proporção local, regional ou global. Entre os efeitos locais cita-se as emissões de material particulado e as mudanças na paisagem por causa da mineração de calcário. O processo produtivo da cal implica na emissão de grandes quantidades de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), responsável principalmente pelas mudanças climáticas. Torna-se fundamental considerar que a produção de 1 tonelada de cal gera a emissão de 1,2 toneladas de  $\text{CO}_2$  (OCHOA et al., 2010).

As empresas produtoras de cal necessitam cada vez mais garantir a qualidade do produto final, melhorar os processos de produção, originando a sustentabilidade e redução os custos de operação para que se mantenham nesse mercado tão competitivo. Neste contexto, os combustíveis representam nos dias de hoje um dos maiores custos nas empresas de cal que possuem fornos de barranco (RODRIGUES, 2015)

A preocupação com a saúde e segurança dos trabalhadores expostos as circunstâncias da produção e beneficiamento da cal, por exemplo, é algo recente. Mauro et al., (2004) abordou que o ambiente de trabalho pode transformar-se em um ambiente agressor ao funcionário, quando o mesmo é submetido a diferentes situações que possam danificar a sua saúde e desempenho. Em vista disso deve-se ter um ambiente protegido através da adoção de medidas

adequadas para o conforto e bem-estar do funcionário. O Ministério do Trabalho do Brasil leva em consideração como insalubre, entre outras, as atividades com intensa exposição ao sol e a grandes quantidades de poeira, da cal, entre outras. (SILVA, RODRIGUES e DIAS, 2007)

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No primeiro Capítulo tem-se a introdução do trabalho, onde encontra-se a contextualização e caracterização do problema. É na introdução que se apresenta a justificativa do tema a ser estudado e os objetivos.

O Capítulo 2, tem-se o referencial teórico utilizado para o estudo, o qual considera informações importantes do ciclo produtivo da cal, tipos de fornos, poluentes e influência do calor no operador.

No Capítulo 3, desenvolve-se a metodologia que será empregada no trabalho, verificando as informações analisadas, as normas e instrumentos que serão utilizados, a descrição de alguns procedimentos

Já no Capítulo 4, encontra-se a discussão do estudo realizado, com análises e propostas de melhorias no setor empresarial base desta pesquisa.

Por fim, no Capítulo 5 encontra-se as conclusões, relacionando as informações obtidas na pesquisa com aos objetivos, além disso, as possíveis limitações que no decorrer do trabalho e que poderão conduzir a estudos futuros.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A CAL

Com o fim do Império Romano e durante a Idade Média a utilização de argamassas à base de cal começou a ser algo mais utilizado. Depois de um tempo passou-se a empregar argamassas à base de gesso e cal com aditivos variados onde se evidencia as gorduras vegetais e animais. O gesso associado com a cal permitia por um lado reduzir a retração ligada à cal e por outro lado adicionar o baixo tempo de presa que está adjunto ao gesso.

A cal dispõe de um princípio mineral, elementos químicos cristalograficamente reunidos, aperfeiçoados desde a época pré-cambriana, entre 4 milhões e 4,5 milhões de anos até a atualidade (GUIMARÃES, 1998). As rochas carbonatadas, que equivalem 0,25% do volume

da crosta terrestre, estão entre as rochas e minerais que as pessoas mais utilizam. Segundo Pereira (2009), o principal produto da calcinação das rochas carbonatadas cálcicas e cálcio-magnesianas é a cal virgem, também designada cal viva e cal ordinária.

A expressão cal virgem, que na literatura brasileira e nas normas da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), é conhecida como o produto composto predominantemente por óxido de cálcio ou por óxido de cálcio e óxido de magnésio, resultantes da calcinação, à temperatura de 900 a 1200 °C, de calcários, calcários magnesianos e dolomitos.

A cal para ter uma boa qualidade depende das propriedades químicas do calcário e da qualidade da queima. É classificada, conforme o óxido que permanecer, em: Cal Virgem

Cálcica (Com óxido de cálcio entre 100% e 90% do óxido total presente); Cal Virgem Magnésiana (Com teores intermediários de óxido de cálcio, entre 90% e 65% do óxido total presente); e Cal Virgem Dolomítica (Com óxido de cálcio entre 65% e 58% do óxido total presente).

A cal produzida no Brasil em sua maior parte deriva da calcinação de calcários/dolomitos metamórficos, de idades geológicas diferentes, na maior parte das vezes, muito antiga (pré-cambriana) e pureza variável. Porém prevalece as cales provenientes de dolomitos e calcários magnesianos e na região nordeste-norte centro as resultantes de calcários (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL, 2008).

Na comercialização da cal, a cal virgem cálcica prevalece, pela sua aplicação nas áreas das indústrias siderúrgicas, de açúcar e de celulose. A proporção de produção é de 1,7 ou 1,8 t de Rocha Calcária para 1t Cal Virgem e com 1t Cal Virgem para 1,3 t Cal Hidratada. (PEREIRA,2009).

Conforme Pereira (2009), no Brasil, tem-se muitas áreas de consumo de cal que são supridas por mais de 200 produtores. A capacidade de produção de suas instalações varia de 1 a 1000 toneladas de cal virgem/dia. Dado ao uso da cal como aglomerante, plastificante e reagente químico, no Brasil, o mercado representa por:

1. afastamento geográfica das suas unidades de fabricação;
2. facilidade e abundância da sua oferta; e
3. o seu baixo custo – o menor entre os reagentes químicos alcalinos e os aglomerantes cimentantes.

A cal tem no Brasil tem muitas utilidades, as principais são nas áreas das indústrias:

- a) siderúrgicas como fluxo (45 a 70 kg/t aço nos fornos);
- b) celulose e papel para recuperar a soda cáustica e para branquear as polpas de papel;
- c) açúcar na remoção dos compostos fosfáticos, orgânicos e na clarificação;

- d) álcalis para recuperar a soda e a amônia;
- e) carbureto de cálcio, em forno elétrico, dá formação ao composto químico;
- f) tintas como pigmento e incorporante de tintas à base de cal e como pigmento para suspensões em água, destinadas às “caiações”; e
- g) alumínio como regeneradora da soda.

Em 2017, a produção mundial foi de 350 milhões de toneladas. A China continuou liderando, com participação de 66%. O Brasil, com 2,3% ocupou a 5ª posição no cenário internacional. Avaliou-se a produção brasileira em 8,3 milhões de toneladas, representada pelos produtores integrados (79%); mercado cativo (15%); mercado cativo produtores não integrados (3%) e transformadores (3%). As regiões Sudeste e Sul do País são responsáveis por 85% da produção de cal virgem e hidratada (Dados referentes a 2014) (MME, 2018).

De acordo com a NBR 6471 (1998), cal virgem é o produto que procede do processo de calcinação, em que se compõe o óxido de cálcio em combinação natural com o óxido de magnésio, sendo capaz de reagir com água.

Tipos de calcário:

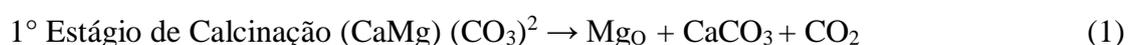
1. Calcário Calcítico:  $\text{CaCO}_3$
2. Calcário Dolomítico:  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

Conforme Gutiérrez et al. (2012), a produção de cal pode ser resumida em cinco etapas básicas

1. Extração de calcário;
2. Britagem de calcário e peneiramento;
3. Calcinação de calcário;
4. A hidratação da cal e de classificação de cal hidratada;
5. Acondicionamento.

Depois de extraída da jazida, a pedra calcária vai para a fábrica para dar início ao processo de britagem. Para então ser moída e embalada para comercialização, ou vai para os fornos de calcinação para ser alterada. Após a calcinação, a cal pode ser moída e comercializada na forma de cal virgem, ou pode ainda sofrer um processo de hidratação para assim ser vendida.

A decomposição térmica da dolomita no interior do forno de cal passa por dois estágios de reação citadas a seguir na equação 1 e 2 respectivamente (CINCOTTO, 1977).



No início, a dissociação está em andamento, a porosidade está aumentando e chegando ao máximo, quando se inicia o fenômeno de coalescimento (tratamento térmico de recozimento com o objetivo de obtenção de carbonetos na forma esfeirodal). Então logo em seguida o estágio segundo começa, de recristalização, e o perfil dos cristais evolui de arredondado para achatado. Os poros, passam de um perfil arredondado para o poligonal. Na fase de recristalização já identificamos a compressão da pedra. (CINCOTTO, 1977).

A calcinação tem por objetivo descarbonatar (extrair o  $CO_2$  agrupado com os óxidos de cálcio ou magnésio) o calcário para a produção de cal virgem. O processo ocorre em fornos que trabalham em altas temperaturas (SILVA, 2007). Os fornos têm-se muitos tipos, tecnologias e combustíveis utilizados, mesmo que o processo químico seja o mesmo: calcário + calor = cal virgem + dióxido de carbono. Logo após a descarbonatação, o produto é conduzido para local de armazenamento antes da moagem. A cal virgem estocada vai para a moagem pelas correias que visa diminuir a granulometria da cal virgem a tamanhos adequados à sua destinação final ou à hidratação, que visa diminuir a granulometria da cal virgem a tamanhos adequados à sua destinação final ou à hidratação (VOTORANTIM, 2013).

Sempre notando que os gases que transportam calor, as vezes contêm  $CO_2$  ou água; esse fato prejudicial se assemelha, em última análise, ao uso de gases *úmidos* no processo de secagem.

Uma rocha calcárias/dolomíticas de boa qualidade vai estar relacionada com a experiência do operador e do seu principal instrumento, o forno. Algumas questões valorizam o papel do operador do forno. Alguns desses fatores sequer estão relacionados, porém podem intervir na calcinação, como a retração da pedra calcinada, a recarbonatação (no resfriador ou no forno), efeito do vapor, a porosidade, o tamanho dos poros, densidade e forma dos grânulos, área superficial do grão e compostos químicos formados com a participação das várias impurezas (GUIMARÃES, 1998).

## 2.2 FORNOS

Calcinação entende-se a transformação, por efeito do calor, do carbonato de cálcio em óxido ( $CaO$ ), chamado de cal ordinária, ou de qualquer outro metal em óxido, aos quais, antigamente, dava-se o nome genérico de cal. Em geral, a calcinação ocorre em temperatura próxima àquela de fusão do material, no caso do calcário, na faixa de 900 a 1.000°C.

A calcinação da pedra calcária para produção da cal, pode ser realizada em fornos simples ao ar livre. Na calcinação ao ar livre, em fornos mais simples, faz-se a escavação de um poço no terreno e acumulam-se os restos de calcário no seu interior, formando o volume de

uma fornalha na sua parte interior. As pedras maiores são alocadas em forma de abóbada e o resto é cheio com pedras de menor dimensão. O combustível geralmente mais utilizado é a lenha (BAUER, 1987).

De acordo com Costa e Silva (2007) a queima é um dos processos de relevância na fabricação de produtos de cerâmica e porcelana, pois é neste processo que o material ganha propriedades adequadas a seu uso, como dureza, resistência e agentes químicos.

O calor imprescindível para as transformações é fornecido pela reação oxidante do oxigênio do ar, com o carbono, com o hidrogênio e com a pequena quantidade de enxofre do óleo combustível, menos nos fornos elétricos. Nos fornos à combustão, tem-se quatro partes básicas (SILVA, 2007): aparelho de combustão; câmara de combustão; aparelhos de expulsão; exaustor e chaminés; e acessórios para controle do forno.

Segundo Filho e Scipião, (2004), no seu estudo, ele analisa quatro tipos de fornos: verticais, rotativos, horizontais e leito. O tipo de forno a ser utilizado vai ser da escolha da indústria, verificando o que deseja obter, e suas condições financeiras. O mais difundido é o forno vertical.

Conforme Silva (2009) os tipos de fornos de calcinação existentes, são vários tipos de fornos utilizados na produção de cal, modificando conforme o tratamento e sofisticação tecnológica das indústrias. O consumo energético na produção da cal depende do tipo de forno utilizado. Os fornos mais utilizados segundo Silva (2009), são:

**Forno de barranco descontínuo:** forno de alvenaria, com revestimento de tijolos comuns recozidos, ou sem revestimento, na maioria das vezes encravado na meia encosta de pequenas elevações, descontínuo, com carga e descarga manuais, com produção até 1.000 t/ano, com fornalha constituída por abóbada da própria pedra (caprichosamente empilhada no seu interior, em cada uma de suas cargas), sem zonas de aquecimento e pré-calcinação (substituídas por uma fase de “esquente”), consumo de combustível elevado (em média, de 280 kg de óleo combustível BPF ou 2,6 metros cúbicos de lenha ou mais, por tonelada de cal virgem) e tiragem natural.

**Forno de barranco contínuo:** forno de alvenaria, bem construído, alto, com chaminé, “boca de fogo” e “cinzeiro”, cilíndrico, com revestimento de tijolos recozidos e refratários, na maioria das vezes encravado na meia encosta e sustentado por estruturas de alvenaria ou metálicas, com carga e descarga semi-automáticas, com produção de 3000 t/ano aproximadamente, sem recuperação de calor (dos gases e da cal virgem), alto consumo de combustível (em média de 220 kg de óleo combustível BPF ou 1,7 metro cúbico de lenha por tonelada de cal virgem) e tiragem forçada.

**Forno vertical metálico de cuba simples:** forno metálico, contínuo, comumente do tipo AZBE, com tiragem forçada e controle termodinâmico, cilíndrico, com recobrimento refratário e isolante, carga e descarga automáticas, com recuperação parcial do calor perdido nos gases e na cal virgem, com produção de até 350 toneladas/dia de cal, com consumo de combustível em média de 132 kg de óleo combustível BTE ou 1,1 metro cúbico de lenha por tonelada de cal virgem.

**Forno vertical metálico de cubas múltiplas e fluxos paralelos:** forno metálico, contínuo, quase sempre do tipo MAERZ, com tiragem forçada e controle termodinâmico, secção circular ou 28 retangular, com revestimento interno refratário e isolante, carga e descarga automáticas, os fluxos dos gases e do ar de combustão são invertidos alternadamente nas cubas (em cada 12 minutos, nos de duas cubas) e uma delas passa a funcionar como recuperadora de calor, com produção de até 144.000 toneladas de cal ano, com consumo de combustível em média 89 kg de óleo combustível BPF e BTE, por tonelada de cal virgem.

## 2.3 CARACTERIZAÇÃO DO COMBUSTIVEL UTILIZADO

### 2.3.1 Composição química da madeira

Conforme Cunha et al. (1989), a estrutura física não é um importante parâmetro na determinação do valor energético das madeiras, mas a composição química é de extrema importância. Em relação a análise dos componentes da madeira, deve-se fazer a separação entre os componentes macromoleculares integrantes da parede celular, que são celulose, hemicelulose e lignina.

A madeira é constituída, em torno de 50% de carbono, 6% de hidrogênio, 44% de oxigênio e 1% de nitrogênio. Esta composição se mantém quase constante, independente da espécie, de diferenças genéticas ou da idade. Também se encontram pequenas quantidades de cálcio, potássio, magnésio e outros, constituindo as substâncias minerais presentes na madeira (Klock et al., 2005).

A madeira, é composta de materiais de alto peso molecular e tem sido descrita como um sistema interpenetrado de polímeros. Os carboidratos representam quase três quartos da composição da madeira, a lignina, praticamente um quarto, cabendo aos chamados extrativos uma fração menor (COLODETTE, 2001).

A celulose é o componente predominante, preenchendo aproximadamente a metade das madeiras tanto de coníferas, como de folhosas. É caracterizada como um polímero linear de alto peso molecular, constituído exclusivamente de  $\beta$ -Dglucose.

Os outros elementos da madeira, que são encontrados em menor quantidade são compostos de baixo peso molecular denominados extrativos, encontrado na casca e abrangendo terpenos, óleos, graxas, taninos, corantes e outros. Segundo Pereira et al. (2000), os extrativos são compostos químicos acidentais, avaliados não fundamentais para a estrutura das paredes celulares e lamela média; são solúveis em água ou outros solventes orgânicos neutros. Entre os extrativos, menciona-se os terpenos, as resinas, os óleos voláteis, as graxas, as ceras e os taninos.

Os extrativos têm sido distribuídos em grupos, com base em algumas características estruturais, mas as vezes ocorrem superposições, devido as características polifuncional de alguns compostos. De acordo com suas características estruturais, os extrativos podem ser classificados em terpenos e terpenoides, ambos formados de unidades de isopreno, polifenóis (flavonoides, antocianinas, quinonas, estilbenos, lignanas e taninos), tropolôneos, glicosídeos, açúcares, gorduras e óleos, materiais de proteção (terpenos, ácidos resinosos, fenóis, ceras) e hormônios vegetais (COLODETTE, 2001).

### **2.3.2 Decomposição térmica da madeira**

De fácil combustão, madeira é muito utilizada como combustível. O aquecimento ou queima da madeira na ausência de oxigênio, conduz a pirólise, a qual produz um mix de produtos, deixando como resíduo a cinza. É a base da destilação seca da madeira. A madeira é estável a 100°C menos pela eliminação da umidade. Entre 100 e 250°C a madeira escurece e perde sua resistência, mas mantém sua estrutura. A altas temperaturas (500°C) ocorre a carbonização e desprendem-se mais substâncias voláteis. A reação (na ausência de ar) torna-se exotérmica entre 275~280°C. Na destilação seca separam-se as seguintes frações: gases não condensáveis, líquido pirolenhoso, alcatrão e carvão (KLOCK et al., 2013).

### **2.3.3 Transporte da lenha**

De acordo com Decope (2014), os custos do transporte são separados em custos fixos e custos indiretos. Os custos fixos são conforme a Associação Nacional do Transporte de Cargas correspondente aos custos de operação e esse é formado da remuneração mensal do capital

investido, salário do motorista, reposição do veículo, licenciamento, seguro do veículo, seguro de responsabilidade civil facultativo. O custo total é a soma do custo fixo com os custos indiretos. Porém, em algumas vezes podem ser necessários adicionar custos variáveis que são aqueles que são iguais a zero quando não ocorre a necessidade deles, mas são necessários em caso de manutenção como os seguintes itens: Peças; Acessórios; Material de manutenção; Despesas com combustível; Lubrificantes; Lavagem e Lubrificações; Pneus e recauchutagens (DECOPE, 2014).

## 2.4 ANÁLISE ENERGÉTICA

Todo o forno utiliza um ou vários tipos de combustíveis e a sua performance depende do tipo de forno e das circunstâncias de funcionamento. Conforme Silva (2009), os combustíveis mais usuais no setor da cal são coque de petróleo (30%), gás natural (20%), lenha (20%), óleo combustível (20%) e carvão (10%). Porém uma análise realizada pela ABPC em 2008 apresenta que a distribuição energética da produção do setor é 43% de lenha, 41% de coque de petróleo, 12% de gás natural e industrial e 2% de óleo combustível e 2% de moinha.

A decomposição do calcário puro ocorre em torno de 900°C e a energia necessária é de cerca de 3,1GJ/t. O dolomito ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) requer menos energia, em torno de 2,6 GJ/t, inclusive porque a decomposição do carbonato de magnésio ocorre a temperaturas mais baixas (JOHN et al., 2014).

Para satisfazer aos requisitos da atualidade de produção, como a advertência ambiental e energética, são empregados cada vez mais os combustíveis alternativos provenientes de resíduos industriais. O biocombustível renovável é a consequência da decomposição térmica da biomassa na ausência de ar, por meio de um processo de carbonização designado pirólise. Todos os tipos de biomassa servem à produção de biocombustível, mas a lenha é a mais utilizada. Por suas características, a lenha, o processo de carbonização possui baixo rendimento e reduz o rendimento global dos processos que usam o biocombustível (ABREU, 2011).

Os órgãos regulamentadores ambientais, influenciados pela pressão social por uma melhor qualidade de vida, estão desenvolvendo algumas leis que determinam explicações para disposição final das distintas variedades de resíduos produzidos nas indústrias. A utilização de alguns destes resíduos industriais como combustíveis alternativos na produção de tem sido um caminho viável para que as indústrias reduzirem seus custos de produção, o consumo de combustíveis fósseis, e ainda colabore para a disposição final desses resíduos. (SALOMON, 2002).

### 2.4.1 Combustão

De acordo com Costa (2013), a geração de calor através da combustão é o resultado da transformação parcial da energia química contida nas ligações entre os átomos que constituem as moléculas dos combustíveis em calor, por meio de sua oxidação, ou seja, combustão. Na combustão acontece a liberação de energia em forma de calor e luz, (CAETANO; DUARTE, 2004).

A combustão é considerada um processo químico no qual um oxidante reage com um combustível, liberando energia térmica, normalmente na forma de gases ou produto de combustão a altas temperaturas (GARCIA, 2002). Combustão é uma reação química de oxido-redução entre um combustível e um comburente, atingindo como objetivo o calor (energia) e sub-produtos.

Um processo de combustão pode ser apresentado por uma reação química universal conforme Coelho e Costa (2007), pela equação 3.



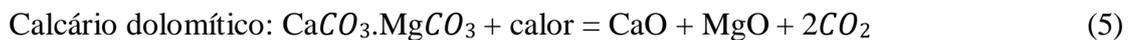
Para obter o máximo de calor, deve-se procurar o maior rendimento da combustão. Todavia, para o rendimento calorífico atender às necessidades solicitadas, é imprescindível que isso seja feito de forma econômica, sendo necessário uma combustão eficiente em relação a quantidade de ar e a melhor mistura ar combustível, e também com passagem do máximo de calor da combustão para o material a ser aquecido (SERFATY, 2007).

### 2.4.2 Reação de combustão da cal

O processo de combustão dura por volta de 10 minutos, variando de forno para forno por causa dos diferentes tipos de combustíveis e de pedra calcária. Posteriormente, a que se chama tempo de ciclo, o processo é invertido para que a outra cuba possa queimar a pedra já pré-aquecida. Este processo deixa um melhor aproveitamento de energia, tornando o forno mais eficiente, visto que a pedra de calcário carece de bastante energia, cerca de 840 Kcal/Kg de cal (3,6 MJ/Kg) para ser transformada em cal.

O monóxido de carbono (CO) é um gás incolor, inodoro, e insípido, gerado pela combustão incompleta. Em altas concentrações, afeta os reflexos humanos. Após sofrer oxidação completa gera o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), causador do aumento do efeito estufa (LUCON, 2003).

Um impacto significativo para o meio ambiente no processo produtivo é a alta emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que acontece mais atentamente na fase de calcinação por causa da descarbonatação do calcário e à queima de combustíveis para geração de energia. Parte importante das emissões de CO<sub>2</sub> são inerentes ao processo de transformação (descarbonatação) e sua proporção em relação à quantidade de produto final (cal virgem) pode ser estimada por meio do cálculo estequiométrico, segundo exemplificado nas equações 4 e 5 respectivamente.



Os principais combustíveis utilizados em fornos para calcinação de calcário para a obtenção da cal virgem são: gás natural; coque de petróleo; carvão mineral ou vegetal (granulado ou em pó); lenha e seus provenientes em toras, lascas ou serragem adequadamente legalizadas de acordo com legislação vigente; combustíveis não tradicionais com aprovação previa do órgão competente. Cada tipo de forno, demanda um tipo de combustível, 30% dos fornos utilizam coque de petróleo, 20% gás natural, 20% lenha, 20% óleo combustível e 10% carvão (SILVA, 2009).

### 2.4.3 Emissões geradas

Conforme John et al., (2014), as emissões de CO<sub>2</sub> também variam em função do tipo de matéria-prima e de cal que é produzida, pois algumas cales hidratadas para a construção civil podem conter mais de 30% de calcário moído, reduzindo tanto o consumo de energia (e as emissões conjuntas) quanto as emissões por descarbonatação. Além das emissões pela descarbonatação do calcário deve-se considerar aquelas provenientes da queima de combustíveis no processo de manufatura. A variedade de combustível e quantidade consumida, está relacionada com a tecnologia utilizada, interfere nas emissões de CO<sub>2</sub>. A produção de uma tonelada de cal virgem cálcica emite 785 kg de CO<sub>2</sub> e de cal virgem dolomítica, 913 kg de CO<sub>2</sub> (JOHN et al., 2014),

John et al., (2014), desenvolveu um estudo sobre as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da queima de combustíveis analisando as variedades de fontes de informação como: informações

primários obtidos em entrevistas com a representante de organização e de empresas que comercializam fornos para calcinação, informações sobre processo produtivo de algumas empresa produtora de cal no Brasil; e dados secundários resultantes de pesquisa em trabalhos científicos sobre a produção da cal no Brasil, relatórios setoriais e governamentais, portfolios técnicos de fornos para calcinação da cal, informações em sites oficiais das empresas fabricantes de fornos para calcinação de cal. Verificaram informações diretas sobre as emissões de  $CO_2$  para a produção de cal virgem e hidratada e energia gasta na calcinação do calcário, e indiretas sobre os tipos de cal, tipo e quantidade de combustível usados, tipos de fornos e matriz energética. Sobre os dados indiretos foram aplicados fatores de conversão de energia e emissão de  $CO_2$ . Na figura 1, encontra-se alguns resultados sobre emissões de  $CO_2$ .

Figura 1 - Energia e emissão de  $CO_2$  segundo tipos de cal e fornos - resultante de levantamento de referências nacionais e empresa

	Dados de Empresas				Dados de referências			
	Emissão kgCO <sub>2</sub> /t		Energia MJ/t		Emissão kgCO <sub>2</sub> /t		Energia MJ/t	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
<b>Descarbonatação (somente valores referentes ao cálculo estequiométrico)</b>								
Cal virgem (geral)					750	913		
Cal virgem (calcítica)					750	800		
Cal virgem (dolomítica)					860	913		
<b>Calcinação (somente valores referentes à queima de combustíveis nos fornos)</b>								
Fornos em geral	188	565	3.350	8.374	269	1.475	3.350	13.162
Forno vertical de alvenaria (FV-A)	479	479	5.234	5.234	666	1.475	8.606	13.162
Forno vertical de fluxo paralelo regenerativo (FV-FPR)	188	337	3.350	4.245	269	269	3.576	3.576
Forno vertical de eixo anular* (FV-EA)	213	385	3.800	4.100				
Forno vertical de cuba simples (FV-CS)			5.580	5.860	399	624	5.303	5.568
Forno horizontal rotativo (FH-R)	564	565	4.606	8.374				

\* Não identificados no Brasil para produção destinada ao mercado aberto.

Fonte: JOHN et al., (2014)

Quanto à emissão de  $CO_2$ , inicialmente tem-se a parcela carecida à decomposição do calcário (1,75 t calcário/t cal virgem), de 770 kg  $CO_2$ /t. A parcela pelo uso de combustível foi considerada, inicialmente, com base na relação energia/emissão para o gás natural, 4,26 mil kcal/t de  $CO_2$ , e o consumo específico para a cal virgem conseguindo 241 Kg  $CO_2$ /t. As caeiras, pequenos fornos, em algumas situações sem registros legais usam como combustível a lenha, resultado de desmates nas regiões (PEREIRA 2009).

As indústrias de diversos setores desempenham papéis importantes no desenvolvimento econômico e social no cenário empresarial brasileiro. A ocorrência do calcário é conhecida há

muito tempo (SILVA, 2009). E destaca-se como uma das principais atividades econômicas da região de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. Sendo uma fonte de renda e emprego para a comunidade que reside na localidade.

A atividade de produção da cal, incluída nas indústrias de minerais não-metálicos, tem como matéria-prima principal o calcário, sendo esse recurso que possuía grande abundância. A maior parte das minas deste produto no mundo é lavrada a céu aberto, nas chamadas pedreiras. Assim explorado, este tem seu custo bastante reduzido. Pedreiras, ou depósitos, podem apresentar grandes extensões e espessura, chegando a ter centenas de metros. Por essa razão, suas minas podem ser de grande porte e de longa vida útil. As principais etapas da lavra nessas condições incluem: remoção do capeamento, perfuração, desmonte por explosivos, e transporte até a usina de processamento (SILVA, 2009).

Todo o meio de exploração abusiva e utilização demasiada de recursos naturais e matéria prima, passou a gerar impactos ambientais ainda maiores com o decorrer do tempo.

Segundo Stachera (2008), as reservas de recursos naturais foram reduzidas de forma nunca vista e avaliada. A produção deste material é degradante, uma vez que além da exploração dos recursos naturais, como o calcário, há ainda a extração da vegetação nativa para utilização como meio de fonte energética. Estas indústrias também são responsáveis pelo alto consumo de energia e recursos naturais produzindo quantidades significativas de resíduos.

Problemas ambientais a nível global como a destruição da camada de ozônio e o efeito estufa, foram agravando-se. Outros impactos ambientais decorrentes do beneficiamento deste recurso, demonstram consequências pela sedimentação da poeira da cal, a partir de sua dispersão atmosférica conforme direção predominante dos ventos, com origem nos focos de calcinação. Nas áreas afetadas, a vegetação tende a sofrer ressecamento da folhagem e os corpos d'água apresentam, diferentemente da tendência regional, pH alcalino, independentemente da natureza do substrato lítico. Solos alcalinizados apresentaram nítida diminuição na disponibilidade de fósforo assimilável em relação aos solos regionais (DUARTE, 2012).

No âmbito energia para o beneficiamento da cal, a madeira, tradicionalmente chamada de lenha, é a fonte energética utilizada para o andamento dos fornos. O que pode-se observar é que a sua utilização como material para produção de calor é realizada desde os primórdios, porém, somente o longo dos tempos, passou a ser utilizada como combustível sólido, líquido e gasoso, em processos para geração de energia térmica, mecânica e elétrica (BRITO, 2007). Ainda, quando se trata do consumo de lenha, há duas variáveis importantes nesse processo, o poder calorífico e a umidade. O ideal é que a umidade da lenha esteja abaixo de 20%. Mas, quando estocada ao ar livre e exposta a longos períodos de chuva, a umidade pode ultrapassar

os 40%. Quando a umidade da mesma é superior a 20%, já há redução do poder calorífico, acarretando também em maior custo na queima, já que é necessário transformar em vapor essa umidade (LEONHARDT et al., 2014).

A lenha é um dos combustíveis mais antigos ainda em uso e até hoje largamente utilizado em muitos países. É composta principalmente de celulose, resinas, água e sais minerais. Usada principalmente como carvão vegetal e na geração de energia elétrica, sendo o restante distribuído no setor residencial e nos setores agropecuários e industriais (VIANA et al., 2012).

As madeiras utilizadas nos fornos de calcinação baseiam-se em acácia-negra e eucalipto. Mesmo que se considere uma forma de combustível ainda retrógrado, elas desempenham papéis importantes no meio ambiente quando suas florestas são analisadas em um grande conjunto. Pois o plantio de eucalipto e acácia-negra em áreas degradadas pela atividade minerária (por exemplo), representa um fator de recomposição de solo e melhoria da sua permeabilidade, criação de ambiente ameno para instalação de outras espécies, incorporação ao solo de matéria orgânica além de fixação nitrogênio atmosférico. Assim, quando estas não são vistas como forma de combustíveis, são benéficas. Porém a combustão destas madeiras gera, como um todo, emissões de  $CO_2$ , que causam danos ambientais.

O aumento da concentração do dióxido de carbono na atmosfera terrestre é um dos fatores determinantes para a ocorrência do efeito estufa, fenômeno responsável pelo aquecimento global. A elevação da temperatura média do planeta coloca em risco o equilíbrio ambiental e a vida na Terra. Considerando o risco que o efeito estufa proporciona, representantes de países de todo o mundo, reuniram-se nas conferências internacionais sobre o meio ambiente e firmaram ações concretas para preservação e melhoramento da qualidade de vida.

O Protocolo de Kyoto, que entrou em vigor em 2005, tem como objetivo promover a redução dos níveis de emissões de gases que provocam o aquecimento global, efeito estufa, principalmente por países com níveis elevados de industrialização. O Brasil, por ser um país em desenvolvimento, não é obrigado a cumprir as metas exigidas, mas é necessário perceber que muitos dos setores contribuem para este agravamento, como o minerário. O relatório IPCC, ou seja, Painel Intergovernamental de Alterações Climática, mostra que o planeta vai aquecer entre 1,8 e 4 graus, fazendo com que ondas de calor e secas se multipliquem. O relatório concluiu como causa principal, a ação humana direta. Ação essa que é intensificada em setores industriais que contam ainda com a mão de obra e produção bruta. Locais que se dispõem de poucos avanços tecnológicos e renováveis para o processo manufatureiro.

A produção de cal emite além do dióxido de carbono outros gases como óxido de nitrogênio, decorrente da reação de alta temperatura entre o nitrogênio e o oxigênio no ar de combustão ou da reação dos compostos nitrogenados encontrados em combustíveis com o oxigênio do ar de combustão. As emissões de dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) (entre 0 e 10 kg/tcal) e monóxido de carbono (CO) (entre 0,3 e 12,5 kg/tcal) dependem do tipo de forno e combustível utilizados (JOHN et al., 2014).

## 2.5 INFLUÊNCIA DO CALOR NO OPERADOR

De acordo com Nielsen (1997), o estresse mediante ao calor é a carga térmica líquida no corpo por partes tanto do calor metabólico concedido quanto de fatores ambientais externos, incluindo temperatura, umidade relativa e movimento do ar, induzindo a alterações fisiológicas. O equilíbrio térmico pode ser provocado pela atividade física, tipo de resistência térmica da vestimenta, também por parâmetros ambientais: temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do ar e umidade relativa. Em algumas situações terá uma parcela de trabalhadores que irão apresentar descontentamento, mas é possível determinar circunstâncias térmicas aceitáveis para um grupo de pessoas dentro de um certo tipo de ambiente, de tal forma que o contentamento atinja 80% dos trabalhadores

A exposição ao calor ocorre em muitas atividades econômicas, permanecendo naquelas que requerem alta carga radiante sobre o trabalhador, e essa é a parcela dominante na sobrecarga térmica que vem a permanecer. Porém, algumas atividades com carga radiante moderada, podem vir acopladas de altas taxas metabólicas (trabalhos extenuantes ao ar livre), também podem proporcionar sobrecargas impróprias. Sempre tomar cuidado que pode haver situações críticas em ambientes em que predomina o calor úmido, quase sem fontes radiantes importantes, como nas lavanderias e tinturarias.

A NR-14 define que para algum fim de uso dos fornos, devem ser construídos solidamente, revestidos de materiais refratários, para que o calor radiante não ultrapasse os limites de tolerância determinado pela NR-15, para assegurar a segurança e conforto ao trabalhador.

A NR 15 define que a exposição ao calor deve ser verificada através do "Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo" - IBUTG definido pelas equações que se seguem:

Ambientes internos ou externos sem carga solar são considerados a partir da equação 6;

$$IBUTG = 0,7 t_{bn} + 0,3 t_g \quad (6)$$

Ambientes externos com carga solar, a partir da equação 7.

$$\text{IBUTG} = 0,7 \text{ tbn} + 0,1 \text{ tbs} + 0,2 \text{ tg} \quad (7)$$

Onde:

tbn = temperatura de bulbo úmido natural

tg = temperatura de globo

tbs = temperatura de bulbo seco.

Os aparelhos que devem ser utilizados nesta avaliação são: termômetro de bulbo úmido natural, termômetro de globo e termômetro de mercúrio comum. As medições devem ser efetuadas no local onde permanece o trabalhador, à altura da região do corpo mais atingida.

O termômetro de globo, para a medição de calor radiante (TG) na carga térmica do organismo atrelada a globo de cobre; Termômetro de bulbo úmido natural (Tbn), que incide na escala de 0°C e 100°C, acoplado num recipiente com água destilada. Mede a capacidade de troca entre a pele e meio através a evaporação da água. Este é influenciado pela umidade relativa e pela velocidade do ar; Termômetro de bulbo seco (Tbs), que mede a capacidade de troca térmica entre a pele e o meio, através da condução, sendo influenciado pela velocidade do ar. Aproveitado quando a situação térmica envolve carga solar, sua escala é de 0°C e 100°C. Nos dias atuais, a utilização da instrumentação eletrônica vem suprimindo os termômetros convencionais, por fornecer maior precisão e valores tbn, tg e tbs, isoladamente, e o cálculo do IBUTG (SCHERVINSKI, et al., 2013).

### **2.5.1 NR 15 - Atividades e operações insalubres - anexo II limites de tolerância para exposição ao calor**

De acordo com a NR 15, A exposição ao calor deve ser avaliada através do "Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo" - IBUTG definido pelas equações que se seguem: Ambientes internos ou externos sem carga solar, podemos verificar na equação 8.

$$\text{IBUTG} = 0,7 \text{ tbn} + 0,3 \text{ tg} \quad (8)$$

Ambientes externos com carga solar, encontrasse na equação 9.

$$\text{IBUTG} = 0,7 \text{ tbn} + 0,1 \text{ tbs} + 0,2 \text{ tg} \quad (9)$$

Onde:

tbn = temperatura de bulbo úmido natural

tg = temperatura de globo

tbs = temperatura de bulbo seco.

Os aparelhos que devem ser usados nesta avaliação são: termômetro de bulbo úmido natural, termômetro de globo e termômetro de mercúrio comum. As medições devem ser efetuadas no local onde permanece o trabalhador, à altura da região do corpo mais atingida.

Limites de Tolerância para exposição ao calor, em regime de trabalho intermitente com períodos de descanso no próprio local de prestação de serviço. Em função do índice obtido, o regime de trabalho intermitente será definido na tabela 1.

Tabela 1 – Tipo de atividade

<b>REGIME DE TRABALHO INTERMITENTE COM DESCANSO NO PRÓPRIO LOCAL DE TRABALHO (por hora)</b>	<b>LEVE</b>	<b>MODERADA</b>	<b>PESADA</b>
Trabalho contínuo	até 30,0	até 26,7	até 25,0
45 minutos trabalho 15 minutos descanso	30,1 a 30,5	26,8 a 28,0	25,1 a 25,9
30 minutos trabalho 30 minutos descanso	30,7 a 31,4	28,1 a 29,4	26,0 a 27,9
15 minutos trabalho 45 minutos descanso	31,5 a 32,2	29,5 a 31,1	28,0 a 30,0
Não é permitido o trabalho, sem a adoção de medidas adequadas de controle	acima de 32,2	acima de 31,1	acima de 30,0

Fonte: NR 15 (1990)

Os períodos de descanso serão considerados tempo de serviço para todos os efeitos legais. A determinação do tipo de atividade (Leve, Moderada ou Pesada) é feita consultando-se

os Limites de Tolerância para exposição ao calor, em regime de trabalho intermitente com período de descanso em outro local (local de descanso).

Para os fins deste item, considera-se como local de descanso ambiente termicamente mais ameno, com o trabalhador em repouso ou exercendo atividade leve. Os limites de tolerância são dados segundo a tabela 2.

Tabela 2 - limites de tolerância

M (Kcal/h)	MÁXIMO IBUTG
175	30,5
200	30,0
250	28,5
300	27,5
350	26,5
400	26,0
450	25,5
500	25,0

Fonte: NR 15 (1990)

Onde: M é a taxa de metabolismo média ponderada para uma hora, determinada pela equação 10.

$$M = M_t \times T_t + M_d \times T_d / 60 \quad (10)$$

Sendo:

M<sub>t</sub> - taxa de metabolismo no local de trabalho.

T<sub>t</sub> - soma dos tempos, em minutos, em que se permanece no local de trabalho.

M<sub>d</sub> - taxa de metabolismo no local de descanso.

T<sub>d</sub> - soma dos tempos, em minutos, em que se permanece no local de descanso.

IBUTG é o valor IBUTG médio ponderado para uma hora, determinado pela equação 11.

$$IBUTG = \frac{IBUTG_t \times T_t + IBUTG_d \times T_d}{60} \quad (11)$$

Sendo:

IBUTG<sub>t</sub> = valor do IBUTG no local de trabalho.

IBUTG<sub>d</sub> = valor do IBUTG no local de descanso.

T<sub>t</sub> e T<sub>d</sub> = como anteriormente definidos.

Os tempos T<sub>t</sub> e T<sub>d</sub> devem ser tomados no período mais desfavorável do ciclo de trabalho, sendo T<sub>t</sub> + T<sub>d</sub> = 60 minutos corridos. As taxas de metabolismo M<sub>t</sub> e M<sub>d</sub> serão obtidas consultando-se na tabela 3. Os períodos de descanso serão considerados tempo de serviço para todos os efeitos legais. Os períodos de descanso serão considerados tempo de serviço para todos os efeitos legais.

Tabela 3 - Regime de trabalho intermitente com descanso no próprio local de trabalho (por hora)

REGIME DE TRABALHO INTERMITENTE COM DESCANSO NO PRÓPRIO LOCAL DE TRABALHO(por hora)	LEVE	MODERADA	PESADA
Trabalho contínuo	até 30,0	até 26,7	até 25,0
45 minutos trabalho 15 minutos descanso	30,1 a 30,5	26,8 a 28,0	25,1 a 25,9
30 minutos trabalho 30 minutos descanso	30,7 a 31,4	28,1 a 29,4	26,0 a 27,9
15 minutos trabalho 45 minutos descanso	31,5 a 32,2	29,5 a 31,1	28,0 a 30,0
Não é permitido o trabalho, sem a adoção de medidas adequadas de controle	acima de 32,2	acima de 31,1	acima de 30,0

Fonte: NR 15 (1990)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A coleta dos dados tratada de forma quantitativa, foi apresentada por números em tabelas, comparativos e gráficos. O tratamento qualitativo é objeto de um estudo específico na área produtiva. Os resultados quali-quantitativos propõem informações para tomadas de decisão dos gestores.

#### 3.2 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A primeira etapa da pesquisa baseia-se no levantamento bibliográfico de toda a área de estudo em questão, ou seja, o referencial teórico desenvolvido no Capítulo 2. Para a elaboração do mesmo utilizou-se artigos da área encontrados em sites de pesquisa acadêmicas, portal de periódicos da CAPES e livros que abordam o tema. Já para obter as informações necessárias para a realização da pesquisa foi efetuada através de visitas in loco na empresa e análise de relatórios disponibilizados pelo gerente. A etapa de obtenção e análise do material foi a fase onde foram feitas das medições a serem avaliadas.

A cidade de Caçapava do Sul está localizada no Rio Grande do Sul, tem um clima excelente e estações climáticas definidas, com 450 metros de altitude. Tendo seu território situado na chamada Zona da Campanha, com amplas jazidas de minérios de cobre, cal e caulim. Em sua configuração topográfica observam-se campos belos e serras grandiosas, com terras escuras e solo silicioso, prestando-se de maneira admirável à criação de gado e à agricultura. (IBGE, 2018a). De economia fundamentalmente sustentada pelos setores da Agricultura, Pecuária e Mineração, sendo que a produção local de calcário representa mais de 80% do que é produzido no Rio Grande do Sul.

Diante deste cenário, para o estudo de caso foi utilizado o forno de uma empresa que atua no ramo do agronegócio e construção civil, a mesma deu início a suas atividades no ramo da agricultura, logo em seguida com o desenvolvimento da construção civil, diversificou suas atividades, atuando na mineração, produção de cal e argamassas. Devido à melhoria da produtividade proporcionada pelo calcário agrícola, seu uso hoje é essencial para atender as demandas da agricultura.

A área de estudo analisada fica na região de Caçapava do Sul localizada no centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul. A extração dos minérios na empresa, basicamente o calcário

dolomítico, são voltadas para a produção de argamassa e cal, utilizadas em áreas como na construção civil e na agricultura para correção de acidez dos solos. A empresa utiliza como matéria prima o calcário calcítico e dolomítico, adquirido da sua própria jazida.

O forno de barranco é denominado assim por estarem apoiados em uma encosta, possuem cerca de quatro a cinco metros de altura e formato tronco cônico. O combustível pode ser adicionado diretamente à carga ou queimado em fornalhas laterais. Na maior parte das vezes o consumo de combustível nesses fornos é alto (GUIMARÃES, 1998).

O forno de barranco contínuo, analisado neste trabalho utiliza combustíveis orgânicos, lenha de acácia-negra e eucalipto com poder calorífico em estado seco de 4800 Kcal/kg e, em estado úmido, 2500 Kcal/kg. Foi verificado que não há um controle rigoroso do estado do combustível (lenha), que pode possuir diferentes graus de umidade, diferentes tamanhos de pedra, provocando maiores ou menores níveis de CO<sub>2</sub> e vapor de água, dificultando os controles de temperatura e, conseqüentemente, a calcinação. Não havendo este controle, isso acarretará em custos mais elevados, alto consumo de matéria prima, levando assim a desperdícios e perdas no processo.

A empresa dispõe hoje em torno de 258 funcionários, sendo 14 envolvidos diretamente no processo de calcinação da cal. A região apresenta imensas jazidas de calcário de ótima qualidade, além de diversos tipos de combustíveis para o processo industrial.

A empresa estudada tem 4 fornos de barranco contínuo, cujo a capacidade teve em média no ano de 2017, 80 toneladas ao dia de pedra, com 47 toneladas de cal produzida, a quantidade de lenha utilizada foi de 1,3 m<sup>3</sup> de lenha por tonelada de cal produzida. Para a calcinação ocorrer a temperatura deve estar entre 900 °C e 1200 °C, o forno trabalha 24 horas, porém se necessário produzir além do que se produz normalmente, baseados nas demandas do mercado externo e da necessidade da fábrica da argamassa.

Os fornos analisados têm as seguintes medidas, diâmetro em baixo 25,60 m, diâmetro em cima 23,30 m e 12 m de altura, tendo quatro bocas de alimentação. A parede tem cerca de 0,9 m de espessura, sendo todo de tijolo refratário por dentro, tendo duas torres e quatro bocas de alimentação. Na figura 2, foi apresentado uma imagem do forno da empresa.

Figura 2 – Imagem do forno da empresa



Fonte: Autor

A empresa opera 24 horas/dia durante toda a semana (7 dias). O abastecimento é feito a cada 2,5 horas. Conforme o calcário vai descendo no interior do forno, vai aquecendo por trocas térmicas dos gases quentes até atingir um nível de temperatura necessária para a combustão, dando início ao processo de calcinação. No processo de Calcinação a pedra é depositada no forno onde permanece em torno de 24 horas, cozinhando a temperatura iniciais de 300 a 500 °C, até atingir níveis mais elevados de temperatura. O resfriamento do produto é dado na câmara inferior, onde o ar necessário à combustão é aquecido, de forma a garantir uma melhoria no rendimento térmico. O material é então retirado pela parte inferior da câmara de resfriamento, onde aguardo ser carregado para a próxima etapa da produção.

A calcinação visa remover o CO<sub>2</sub> do calcário para produzir assim a cal virgem. Logo após o calcário ter sido consumido na combustão, o processo de calcinação é finalizado, após este processo a pedra fica à espera da descarga, onde esfria para cerca de 200 a 300 °C e é descarregada via vagões para um depósito, onde seguirá para o processo da moagem. O consumo atual de lenha é de 1936 m<sup>3</sup> por mês, sendo de acácia 922 m<sup>3</sup>/mês e Eucalipto 1014 m<sup>3</sup>/mês. O custo da acácia R\$52,00 por m<sup>3</sup> e Eucalipto R\$53,00 por m<sup>3</sup>.

Uma calcinação adequada irá depender das rochas calcárias calcíticas/dolomíticas, das condições de operação do forno e da qualidade da matéria-prima. Porém a falta de conhecimento da relação desses fatores na qualidade e produtividade da cal virgem faz com que a operação dos fornos dependa exclusivamente da experiência do operador. Alguns desses fatores que podem interferir na calcinação, e cuja manipulação cuidadosa dos fornos permitem seu controle, são a retração da pedra calcinada, a recarbonatação no resfriador ou no forno, efeito do vapor (GUIMARÃES, 1998).

### 3.3 ANÁLISE DAS INFORMAÇÕES

#### 3.3.1 Consumo de lenha

O consumo do combustível dos fornos da Empresa foi analisado com base na lenha utilizada por cada batelada. O estudo realizou um acompanhamento contínuo de 10 bateladas que é o que acontece diariamente. Considerando que cada batelada tem 2 toneladas de pedra, e são feitas em torno de 10 diariamente, tendo 4 fornos e cada um com sua boca de alimentação, A cada 2,5 horas é realizada uma nova batelada, a mesma contém 2 toneladas de pedra em cada um, totalizando 8 toneladas em cada batelada.

Capacidade do forno; 1,7 m<sup>3</sup> de lenha por tonelada de cal virgem

Consumo da lenha por batelada: 10,4 m<sup>3</sup> (dados empresa)

Consumo de lenha/tonelada de cal: 1,3 m<sup>3</sup> para 1 tonelada de cal (dados empresa)

Tempo da fornada: 24 horas

De acordo com a literatura, Silva (2009), fornos de barranco tem um alto consumo de combustível (1,7 m<sup>3</sup> de lenha por tonelada de cal virgem). Sendo assim, o consumo de lenha seria de 13,6 m<sup>3</sup> de lenha por batelada e não 10,4 m<sup>3</sup>. A empresa não tem controle rigoroso sobre as quantidades utilizadas.

A taxa de conversão na calcinação dos carbonatos é ajustada pelo fornecimento de calor para a decomposição, menos para partículas maiores do que 40 mm. Assim, a calcinação dos carbonatos é dirigida pelas mesmas leis que se aplicam às reações controladas pela difusão: o tempo de decomposição é proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula e a taxa de conversão é inversamente proporcional ao diâmetro da partícula (HECK, 2017).

Segundo Soares (2007), a avaliação da cinética de calcinação é relativamente complexa devido a fatores, como:

- (1) A concentração de CO<sub>2</sub>, a qual atrapalha a reação;
- (2) A granulometria da partícula. O tamanho da partícula pode adentrar tanto limitações na transferência de energia quanto na transferência de massa;
- (3) A inibição catalítica pela presença de impurezas.

A taxa de calcinação dos carbonatos se torna elevada quando se atinge a temperatura onde a pressão parcial de equilíbrio do CO<sub>2</sub> ou da água torna-se igual à pressão total do reator; esta temperatura é denominada de temperatura de decomposição ou de calcinação.

Barker (1973), revelou em seu estudo que a calcinação completa pode ser alcançada rapidamente, isto é, em menos de 1 minuto de operação. Nota-se que, as taxas da reação bem como a reatividade da cal virgem, estão diretamente ligadas à temperatura na qual a cal foi calcinada.

De acordo com Viana et al. (2012), a perda total é basicamente formada por:

- a) Perdas por transferência de calor – o calor absorvido pelas paredes, pelo teto e pela soleira do forno e liberado por radiação e convecção. O valor destas perdas, ainda que possam ser calculados, são estimados em função do isolamento, correspondendo à cerca de 20% do calor total.
- b) Perdas por vazamentos na estrutura do forno - que costumam operar com pressão superior à atmosférica, e perdas de calor pela porta, quando esta é aberta. Estas perdas variam entre 2% e 8% do calor total, dependendo da operação e da manutenção do forno.
- c) Perdas pela chaminé - As perdas na chaminé podem ser divididas em duas parcelas principais: as perdas associadas aos gases secos formados na combustão e as perdas próximas ao vapor presente na chaminé.

#### 3.4 ANÁLISE DO BEM ESTAR DO TRABALHADOR ENVOLVIDO DIRETAMENTE NO PROCESSO

A análise do calor foi realizada com a assistência do Termômetro LASER Sensor Medidor Temperatura Digital e Medidor De Stress Térmico Tgd 400 *Instrutherm*, que mede os valores de temperatura de bulbo seco, bulbo úmido natural, globo e IBUTG. A temperatura foi verificada próximo do forno e também as medições foram efetuadas no local onde permanece o trabalhador, à altura da região do corpo mais atingida. A medição foi feita entre os dias 10 e 15 de julho de 2018, foram feitas duas medidas por dia, para assim se ter uma média das temperaturas.

No que diz respeito as temperaturas, outras variáveis que interferem foram encontradas na maior ou menor sobrecarga térmica, iniciando pelas condições climáticas da região onde está implantado o empreendimento florestal pois nas de clima quente a temperatura ambiente tem influência significativa na elevação dos índices de sobrecarga térmica.

Outros fatores que contribuem para sobrecarga térmica a condução do processo de carbonização, período destinado ao resfriamento do forno, o tempo entre a abertura do forno e início do descarregamento.

Nos Fornos de Superfície, como nos Retangulares durante o descarregamento de carvão e carregamento com lenha, ora os trabalhadores estão dentro do forno ora fora deles.

A consulta a Portaria 3214/78 do Ministério do Trabalho em sua Norma Regulamentadora nº 15, Anexo nº 3, Quadros 2 e 3 que estabelece Limites de Tolerância para exposição ao calor, observamos que a variável dentro e fora do forno não interfere no metabolismo já que as atividades são semelhantes demandando o mesmo esforço físico.

De acordo com a NR 15, anexo III, a exposição ao calor deve ser avaliada através do "Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo" - IBUTG definido pelas equações que se seguem:

Ambientes internos ou externos sem carga solar, podem ser verificados na equação 8.

$$\text{IBUTG} = 0,7 \text{ tbn} + 0,3 \text{ tg} \quad (8)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CONSUMO DE LENHA

Conforme foi analisado no processo de calcinação os quatro fornos produzem 10 bateladas por dia. Cada batelada com 2 toneladas de calcário, totalizando 8 toneladas por batelada de matéria prima.

Conforme Lins (2007), é necessário 1,7 tonelada de calcário para cada tonelada de cal virgem. Portanto, aumentando a quantidade de lenha no forno a capacidade calorífica é aumentada. Assim sendo o fluxo de calor transmitido para o calcário aumenta, fornecendo a mesma quantidade de energia em menos tempo. Isto se traduz em reduzir o tempo por batelada. Portanto, o tempo de cozimento pode diminuir em até 20%.

A tabela 4, mostra os parâmetros do cenário atual com o cenário projetado que iria diminuir os custos da empresa.

Tabela 4 - Cenário atual e cenário projetado da empresa analisada

Parâmetros	Cenário atual	Cenário projetado	Unidades
Bateladas	10	11	dia
Quantidade de matéria prima	80	88	toneladas
Tempo	2,5 horas	2 horas	horas
Lenha utilizada diariamente	61,1 m <sup>3</sup>	86,7 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
Produção de cal	47	51	Ton/dia

Fonte: Autor

Com o aumento do fluxo de calor o tempo de cozimento será de 2 horas e o número de bateladas por dia passará de 10 para 11. Com isso, a quantidade de matéria prima aumentará de 80 para 88 toneladas e a quantidade de cal produzida aumentará de 47 para 51 toneladas. A lenha utilizada aumentará 25,6 m<sup>3</sup>, e a produção diária terá um ganho de 4 toneladas de cal produzida.

#### 4.2 ANÁLISE DOS CUSTOS ENVOLVIDOS

A tabela 5 mostra os custos anuais referentes ao forno.

Tabela 5 - Custos referentes ao forno da empresa.

Informações	Custo (R\$/ano)
Aquisição de lenha	1.220.000,00
Manutenção	10.000,00
Funcionários	545.000,00
<b>Total</b>	<b>1.775.000,00</b>

Fonte: Autor

São realizadas manutenções corretivas, geralmente nas esteiras e vagonetas envolvidas ao forno. No forno ocorre uma manutenção, na qual são substituídas algumas pedras e rebocos. Assim sendo, custo de mão de obra e matéria prima é estimado em R\$10.000,00. Além disso, são 14 funcionários envolvidos no processo.

A tabela 6 apresenta os custos e lucro, segundo pesquisas realizadas no mercado. A partir dos valores de produção, subtraídos dos custos, verificou-se que após a otimização do processo sugerida por este trabalho o lucro é de R\$ 37.000,00. Isto é, um aumento de 4% nos ganhos da empresa.

Tabela 6 - Produção versus ganho

Preço da cal, por tonelada	R\$ 600,00
Valores conforme produção mensal, cenário atual (1.410 toneladas)	R\$ 846.000,00
Valores conforme produção mensal, cenário projetado (1.530 toneladas)	R\$ 918.000,00
Custo da lenha, cenário atual	R\$ 101.500,00
Custo de lenha, cenário projetado	R\$ 136.500,00
Custo com o aumento da produção	R\$ 35.000,00
Ganhos com o aumento da produção	R\$ 72.000,00
<b>Lucro líquido</b>	<b>R\$ 37.000,00</b>

Fonte: Autor.

#### 4.3 ANÁLISE DO BEM-ESTAR DO TRABALHADOR ENVOLVIDO DIRETAMENTE NO PROCESSO

As medições que foram obtidas no local, foram realizadas com o Termômetro LASER Sensor Medidor Temperatura Digital, e calculadas as médias diárias. Pode-se verificar na tabela 7 e tabela 8.

Tabela 7 - ANÁLISES DAS TEMPERATURAS

Dias	1	2	3	4	5
Temperatura inicial perto da boca do forno (°C)	40	39	38	40	40
Temperatura na parte de cima do forno (°C)	300	240	290	285	300
Temperatura no meio do forno (°C)	1030	1005	1000	1030	1000
Temperatura no dia da análise (°C)	9	10	9	10	12

Fonte: Autor

Tabela 8 - Análises das temperaturas 2

Temperatura inicial perto da boca do forno	39,4 °C
Temperatura na parte externa de cima do forno	223°C
Temperatura interna	1013°C
Temperatura no dia da análise	10°C

Fonte: autor

Utilizando o Medidor De Stress Térmico Tgd 400 *Instrutherm*, que mede os valores de temperatura de bulbo seco, bulbo úmido natural, globo e IBUTG, foi possível o cálculo do IBUTG.

As medições foram realizadas nos postos de trabalho, onde os funcionários realizam as atividades, na altura da região do tronco, para então mensurá-los. Foram cinco dias de amostras, destas dez, foi feita a média e diária, então foi realizada a média novamente.

Dados encontrados:

Termômetro de bulbo úmido (Tbn): 35,5 °C

Termômetro de globo (Tg): 39,4 °C

IBUTG= 36,7 °C

Seguindo os parâmetros da NR 15, a atividade do operador é pesada, pois de acordo com a NR Trabalho intermitente de levantar, empurrar ou arrastar pesos. Considerando que o operador trabalhe por 45 minutos e descanse 15 minutos, ele pode ser exposto por 25,1 °C a 25,9 °C, então foi verificado que nesta atividade o operador mesmo utilizando os equipamentos de segurança fica exposto a altas temperaturas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo teremos as conclusões obtidas a partir dos resultados encontrados. Bem como, as limitações e sugestões para trabalhos futuros são apresentados.

### 5.1 CONCLUSÕES

Com a referência bibliográfica e pesquisas realizadas na empresa foi possível caracterizar o combustível que o forno utiliza atualmente. Com a análise foi possível verificar que se a empresa aumentar a quantidade do combustível em 20% irá aumentar a produção em 10% e conseqüentemente os lucros em 4%.

A empresa deve controlar os níveis de umidade da lenha e tamanho da pedra, pois no trabalho verificou-se que são dois fatores importantes para se ter um combustível mais eficiente. O ideal seria a substituição do forno por um mais tecnológico e mais eficiente, porém o investimento é muito alto.

É possível constatar de acordo com os resultados, referente ao forno, que os níveis de calor que os colaboradores estão expostos, estão acima do limite de tolerância, comparando com o Anexo nº 3 da NR-15, sendo considerada uma atividade insalubre. Constatou-se que o ambiente de trabalho no forno da empresa proporciona situação de exposição acima do recomendado em legislação. Porém, isto pode ser controlado com a ação preventiva de equipamentos de proteção individual e coletivo.

É necessário investimento e melhorias no processo de produção e no fator humano, visando a qualidade de vida, segurança para proporcionar um ambiente mais saudável e confortável.

## 5.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Recomenda-se implementar na prática no forno os processos de queima e transferência de calor sugeridas por este trabalho, os quais foram baseados em análises teóricas. Além disso, controlar minuciosamente todas as fases do processo, a fim de evitar perdas. Assim, será verificado se os lucros projetados podem ser alcançados.

Projetar e construir uma esteira que leve a lenha até a entrada do forno, para assim evitar a exposição dos trabalhadores ao calor.

Recomenda-se também desenvolver um local apropriado para o armazenamento da lenha para controlar a umidade, a fim de reduzir o tempo da calcinação, diminuindo gastos e desperdícios e otimizando o processo como um todo.

## REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/>>. Acesso em: 20 out. 2018.

ABPC. **Associação Brasileira dos Produtores de Cal**. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.abpc.org.br/>> Acesso em: 8 de maio de 2018.

ABREU, G. C. **Estudo da redução das emissões de gases efeito estufa através da utilização da biomassa renovável em substituição parcial ao coque e antracito utilizados no processo de fabricação do sínter**. Guaratinguetá: Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6471: Cal virgem e cal hidratada – Retirada e preparação de amostra – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1998.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção** 1. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1987.

Barker, R. **The reversibility of the reaction  $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$** . J. Appl. Chem. Biotechnol. 23 (1973) 733–742.

BRASIL, **Normas Regulamentadoras do Ministério do Trabalho e Emprego**. Disponível em: <<http://portal.mte.gov.br/legislacao/normas-regulamentadoras-1.htm>>. Acesso em: 20 dez. 2018.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos avançados**. 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v21n59/a14v2159.pdf>>. Acessado em 08 de março de 2018

CAETANO, L; DUARTE JUNIOR, L. A. Estudo comparativo da queima de Óleo BPF e de lenha em caldeiras-estudo de caso. ABCM (Ed.). **Anais do XI CREEM**. Nova Friburgo, 2004.

CINCOTTO, M. A. **Estudo da composição química da cal hidratada produzida no estado de São Paulo**. 1977. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1977.

COSTA, C.G; SILVA, A.M. **Alvenaria Estrutural com Bloco Cerâmico**: apostila Técnica de Segurança do Trabalho. Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL / Setor Ciências Exatas, 2007.

COSTA, F. C. **Gases combustíveis como alternativas à eletrotermia em aquecimento direto e calor de processo no setor industrial brasileiro**, 2013, 211 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

COELHO, P.; COSTA, M. Combustão. **Edições Orion**. 1º ed. Outubro de 2007.

COLODETTE, J. L. Apostila de curso de pós-graduação Lato Sensu em Tecnologia de Celulose e Papel – Módulo I. UFV, abril, 2001.

DALLAROSA, A. Z. **Proposta de melhoria no processo industrial do carbonato de cálcio apoiada em modelo de referência do desenvolvimento de produto e processo.** Trabalho de conclusão de curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Ponta Grossa.2011.

DECOPE, 2014. **Departamento de Custos Operacionais.** Estudos Técnicos e Econômicos. Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas - 2014. São Paulo/SP. Edição: 2014.

DUARTE, W. H.B. **Aspectos da contaminação geoquímica ambiental da produção de calcários corretivos e cal na região de santa maria do cambucá – Pernambuco: considerações sobre a produção mineral regional.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2012.

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial.** Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2002.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil.** Associação Brasileira dos Produtores de Cal. 1ª Edição, São Paulo,1998.

GUTIÉRREZ, A. S. et al. Evaluation of the environmental performance of lime production in Cuba. **Journal of Cleaner Production.** 2012.

HECK, N.C. Calcinação. **ENG06632-Metalurgia Extrativa dos Metais Não Ferrosos II-A – DEMET UFRGS.** www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06632/Calcinacao.pdf. Acesso em fevereiro 2019

IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura – PEVS – series históricas. 2018b.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html?=&t=series-historicas>>. Acesso em: 19 maio 2019.

JOHN, V. et al. **Produção de Cal. Em Economia De Baixo Carbono: Avaliação De Impactos De Restrições E Perspectivas** Tecnológicas Ribeirão Preto - SP, 2014.

KLOCK, U., ANDRADE, D. S A. **Química da madeira.** Curitiba, UFPR, 4 eds., p. 85, 2013.

KLOCK, U.; MUNIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira.** 3. ed. Curitiba: UFPR, 2005. 86 p.

LEONHARDT, L. et al. A influência da umidade da lenha de eucalipto na produção de vapor em uma caldeira flamotubular. In **Semana de iniciação científica UNISC, 2014.**

LINS, F. A.F. Cimento. Anuário Estatístico, 2007, Setor de Transformação de Não-Metálicos. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM, Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral – DTTM/MME - Ministério de Minas e Energia – MME, p. 25-33.

LUCON, O. dos S. **Modelo Horus inventário de emissões de poluentes atmosféricos pela queima de combustíveis em indústrias no estado de São Paulo**. 2003. Tese (Pós-Graduação em Energia / Energia). Escola Politécnica, Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.

MAURO, M.Y.C., MUZI, C.D., GUIMARÃES, R.M., MAURO, C.C.C. Riscos Ocupacionais em Saúde. **Revista de Enfermagem UERJ**. 2004. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/csc/v8n3/17460.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2018.

MME. **Ministério de minas e energia**. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/web/guest/aceso-a-informacao/legislacao/decretos/2018>>. Acesso em: 20 jan., 2019.

NIELSEN, R. N. **Estresse por calor. A abordagem ergonômica como proposta para melhoria do trabalho e produtividade em serviços de alimentação**. 1997. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 1997.

NR, Norma Regulamentadora Ministério do Trabalho e Emprego. NR -15 – Atividades e Operações Insalubres.1990

NR, Norma Regulamentadora Ministério do Trabalho e Emprego. NR -14 –Fonos.1983

Rodrigues, R. A. **Potencial utilização de resíduos do processamento do café como combustíveis visando seu emprego em fornos rotativos de calcinação**. 2015. Monografia apresentada como requisito parcial para a conclusão de Graduação do Curso de Engenharia Industrial Química - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2015

OCHOA, P. A. G. et al. Cleaner production in a small lime factory by means of process control. *Journal of Cleaner Production*. v. 18, n. 12, 2010.

PEREIRA, L.: FERREIRA. G. A indústria da cal no brasil. **Xvii jornada de iniciação científica – cetem**, 2009. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/500/1/27luana%20dos%20santos%20pereira.pdf>>.Acesso em mar. 2018.

SALOMON, V. G. “**Avaliação dos efeitos da presença de metais pesados nos resíduos co-processados quando utilizados como combustíveis alternativos e matéria-prima na indústria cimenteira**”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI – Itajubá-MG, 2002.

SERFATY, R. **Combustão e queimadores**. CENPES. 2007

SANCHEZ, Luís Henrique. **Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos**; São Paulo, Oficina de Textos, 2008.

SILVA, A. C. **Estudo e otimização da reação de hidratação do hidróxido de cálcio**. Dissertação de mestrado—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

SILVA, F. L. F.; **Avaliação da remoção de sulfeto de hidrogênio do gás Natural em uma coluna de absorção**. 2009. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo: Engenharias de Processos em Plantas de Petróleo e Gás Natural, Natal/RN, Brasil. 2009

SILVA, J. O. **Perfil da Cal, Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral-SGM**. 2009. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano\\_duo\\_decenal/a\\_transformacao\\_mineral\\_no\\_brasil/P46\\_RT72\\_Perfil\\_do\\_Cal.pdf](http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_transformacao_mineral_no_brasil/P46_RT72_Perfil_do_Cal.pdf)> Acesso em: 14 abr. 2018

SCHERVINSKI, B.J..O; CATAI, E.R; NETTO, S.E; ROMANO, C.A; avaliação dos níveis de calor de fornos de queima de porcelanas em uma empresa na cidade de campo largo – PR. **XXXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2013\\_TN\\_STP\\_180\\_029\\_22209.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_STP_180_029_22209.pdf)> Acesso em: 20 fev.2019

STACHERA, Theodozio. Avaliação de emissões de CO<sub>2</sub> na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no paraná. **XXVIII Encontro nacional de engenharia de produção**. Rio de Janeiro, 2008.

VIANA, A. N. C.; BORTONI, E. C.; NOGUEIRA, F. J. H.; HADDAD, J.; NOGUEIRA, L. A. H.; VENTURINI, O. J.; YAMACHITA, R. A., **Eficiência Energética: fundamentos e aplicações**. 1ª ed. Elektro. Universidade Federal de Itajubá. EXCEN. Fupai, Campinas-SP, 2012.

VOTORANTIM. **Processo de fabricação da cal**. 2013. Disponível em: <[http://www.vcimentos.com.br/htms-ptb/Produtos/Cal\\_procFabricacao.html](http://www.vcimentos.com.br/htms-ptb/Produtos/Cal_procFabricacao.html)>. Acesso em: 22 out. 2018.