

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GIOVANNA RAMOS DE OLIVEIRA COELHO**

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS EM FORNOS  
DE UMA EMPRESA CIMENTEIRA**

**GUARAPUAVA**

**2021**

**GIOVANNA RAMOS DE OLIVEIRA COELHO**

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS EM FORNOS  
DE UMA EMPRESA CIMENTEIRA**

**ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF FUELS USED IN FURNACES OF A  
CEMENT**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Franciele Bonatto

**CIDADE**

**ANO DA ENTREGA**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**GIOVANNA RAMOS DE OLIVEIRA COELHO**

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS EM FORNOS  
DE UMA EMPRESA CIMENTEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 10/Dezembro/2021

---

Franciele Bonatto  
Dra. em Engenharia de Produção  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Gessica Katalyne Bilcati  
Ms. em Engenharia Civil  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Rafaella Salvador Paulino  
Ms. em Engenharia de Edificações e Saneamento  
Faculdade Guarapuava

**GUARAPUAVA**

**2021**

Dedico este trabalho à Deus, à meus pais, minha irmã e toda minha família que estão presentes na minha vida. Dedico também a meus amigos, colegas de faculdade e minha orientadora que individualmente participaram dos momentos da minha jornada acadêmica.

## RESUMO

Em virtude da concorrência acirrada do mercado e das melhorias das inovações tecnológicas e de aprimoramento persistentes, as indústrias cimenteiras no mundo precisam buscar melhorias e otimização de seus processos operacionais para aprimorar seus produtos. Este trabalho tem como objetivo analisar os parâmetros dos combustíveis utilizados em fornos de uma empresa cimenteira, em três níveis (ecologicamente correto, disponibilidade e desempenho). Para alcançar o objetivo proposto, foi realizado um estudo de caso em uma empresa cimenteira multinacional. Foram analisados os parâmetros poder calorífico, umidade, cinzas e cloro, além de uma análise com viés sustentável dos combustíveis primários e os combustíveis alternativos utilizados em fornos na produção de clínquer da empresa em estudo. A partir dos resultados encontrados nos dados técnicos dos parâmetros dos combustíveis utilizados na fábrica foi possível analisar a qualidade do produto final, o clínquer, que ocorre durante processo de combustão. O parâmetro que pode-se relacionar diretamente com a qualidade do clínquer no processo é o poder calorífico. A partir dos dados obtidos, foi possível analisar que ambos os tipos de combustíveis (primários e alternativos) possuem alto poder energético, mas a utilização em maior porcentagem do combustível alternativo traz vantagens técnicas, sustentáveis, sociais e até mesmo econômicas para a empresa de estudo, quando avaliados pelo critério de qualidade em conjunto dos benefícios ambientais, pois garantem também a qualidade do produto final devido ao alcance energético do processo atingir altos valores.

Palavras-chave: parâmetros dos combustíveis, sustentabilidade, eficiência energética, coque, carvão, combustível alternativo.

## **ABSTRACT**

Due to fierce market competition and persistent improvements in technological innovations and improvement, cement industries worldwide need to seek improvements and optimization of their operational processes to improve their products. This research aims to analyze the parameters of fuels used in kilns of a cement company, evaluating at three levels (ecologically correct, availability and performance). To achieve the proposed objective, a case study was conducted in a multinational cement company. To achieve the proposed objective, a case study was carried out in a multinational cement company. The parameters of ash, calorific value, chlorine and moisture were analyzed, in addition to an analysis with a sustainable bias of the fuels and alternative fuels used in kilns in the production of clinker at the company under study. From the results found in the technical data of the parameters of the fuels used in the factories, it was possible to analyze the quality of the final product in the clinkerization process. The parameter that can be directly related to the quality of the clinker in the process is the calorific value. From the data obtained, it was possible to analyze that both types of fuels (primary and alternative) have high energy power, but the use of a higher percentage of alternative fuel brings technical, sustainable, social and even economic advantages for the study company, evaluated by the quality criterion together of the environmental benefits, also guaranteeing the quality of the final product due to the energetic reach of the process reaching high levels.

Keywords: fuel parameters, sustainability, energy efficiency, coke, coal, alternative fuel.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma do processo de produção do cimento Portland.....	20
Figura 2 – Esquema de forno de clínquer .....	22
Figura 3 – Processo de clinquerização em alto forno.....	23
Figura 4 – Unidades de coprocessamento no Brasil .....	28
Figura 5: Fluxograma das etapas de estudo.....	48
Fotografia 1 – Nódulos de clínquer .....	22
Gráfico 1 – Vendas acumuladas de cimento em um ano.....	18
Gráfico 2 - Oferta de energia primária no Brasil em 2004.....	24
Gráfico 3 - Consumo de combustíveis no mercado global em 2019 .....	25
Gráfico 4 – Balanço do consumo de combustíveis nas cimenteiras no Brasil .	26
Gráfico 5 – Acúmulo de resíduos coprocessados em fornos de cimento de 2000 a 2017 .....	29
Gráfico 6 – Porcentagem de utilização dos combustíveis até 2050 .....	33
Gráfico 7 – Utilização dos tipos de combustíveis alternativos em fábricas de cimento.....	34
Gráfico 8 – Representação percentual do poder calorífico dos combustíveis presente no processo de clinquerização em alto fornos de fábricas cimenteiras .....	35
Gráfico 9 – Porcentagens de combustíveis no mix para uma média Brasil.....	68
Gráfico 10 – Valores percentuais para o poder calorífico em uma média Brasil .....	71
Quadro 1 – Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil .....	19
Quadro 2 - Normas das análises de ensaio das características físico-química dos combustíveis .....	38
Quadro 3 – Análise da disponibilidade dos combustíveis alternativos por regional .....	53
Quadro 4 – Análise da disponibilidade dos combustíveis primários por regional .....	54
Quadro 5 – Parâmetros percentuais técnicos dos principais exemplos de combustíveis primários .....	55
Quadro 6 – Parâmetros percentuais técnicos dos principais exemplos de combustíveis alternativos .....	56
Quadro 7 – Parâmetros técnicos dos combustíveis primários – Poder Calorífico (Kcal/kg).....	58
Quadro 8 – Parâmetros técnicos dos combustíveis primários – Umidade (mm %) .....	59

<b>Quadro 9 – Parâmetros técnicos dos combustíveis primários – Cinzas (kg %)</b>	<b>60</b>
<b>Quadro 10 – Parâmetros técnicos dos combustíveis alternativos – Poder Calorífico (Kcal/kg)</b> .....	<b>61</b>
<b>Quadro 11 – Parâmetros técnicos dos combustíveis alternativos – Umidade (mm %)</b> .....	<b>62</b>
<b>Quadro 12 – Parâmetros técnicos dos combustíveis alternativos – Cinzas (kg %)</b> .....	<b>63</b>
<b>Quadro 13 – Parâmetros técnicos dos combustíveis – Cloro (kg %) .....</b>	<b>64</b>
<b>Quadro 14 – Análise da relação percentual dos combustíveis primários</b> .....	<b>67</b>
<b>Quadro 15 – Percentual do poder calorífico dos combustíveis primárias na composição do mix de combustíveis alternativos e primários para a produção de clínquer .....</b>	<b>69</b>
<b>Quadro 16 – Percentual do poder calorífico dos combustíveis primárias na composição do mix de combustíveis alternativos e primários para a produção de clínquer .....</b>	<b>70</b>



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Requisitos dos parâmetros dos combustíveis em alto-fornos na Europa.....</b>	<b>38</b>
--	-----------

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>A importância do tema</b>	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>14</b>
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	14
<b>1.3</b>	<b>Justificativa</b>	<b>14</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Conceituação: O cimento e a indústria cimenteira</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Clínquer e o processo de clínquerização</b>	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Combustíveis</b>	<b>23</b>
2.3.1	Coque	26
<b>2.4</b>	<b>Combustíveis Alternativos</b>	<b>27</b>
2.4.1	Histórico do coprocessamento	27
2.4.2	Combustíveis alternativos	29
2.4.3	Potência de coprocessamento no Brasil	32
2.4.4	Classificação de combustíveis alternativos	34
<b>2.5</b>	<b>Parâmetros técnicos dos combustíveis</b>	<b>37</b>
2.5.1	Material Volátil	38
2.5.2	Poder calorífico	39
2.5.3	Cinzas, enxofre e umidade	40
2.5.4	Parâmetros influenciados por ações externas	42
2.5.5	Produtividade	43
2.5.6	Utilização de misturas de combustíveis do MIX	44
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>Objeto de estudo</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>Caracterização da área de estudo</b>	<b>46</b>
<b>3.3</b>	<b>Procedimentos metodológicos</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>50</b>
<b>4.1</b>	<b>Identificação dos combustíveis primários e alternativos</b>	<b>50</b>
<b>4.2</b>	<b>Análise de desempenho dos combustíveis</b>	<b>54</b>
4.2.1	Valores esperados dos parâmetros utilizados pela empresa	55
4.2.2	Combustíveis primários	57

4.2.3.1	Parâmetro poder calorífico.....	57
4.2.3.2	Parâmetro umidade.....	58
4.2.3.3	Parâmetro cinzas.....	59
4.2.3	Combustíveis Alternativos.....	60
4.2.3.1	Parâmetro poder calorífico.....	60
4.2.3.2	Parâmetro umidade.....	61
4.2.3.3	Parâmetro cinzas.....	62
4.2.3.4	Parâmetro cloro.....	63
4.2.4	Análise dos parâmetros dos combustíveis.....	64
<b>4.3</b>	<b>Análise do Poder Calorífico na mistura dos combustíveis.....</b>	<b>66</b>
<b>4.4</b>	<b>Análise sustentável.....</b>	<b>71</b>
<b>4.5</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES DE FUTURAS PESQUISAS.....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 A importância do tema

A industrialização foi fundamental no processo de crescimento e aceleração da economia no Brasil. Essa esfera industrial evidenciou a necessidade de expansão em outros âmbitos como o ambiental e o social. É inevitável que a indústria até hoje causa um grande impacto social e ambiental (MARSON, 2014).

A criação e desenvolvimento tecnológico das máquinas até hoje demonstra o desenvolvimento que atinge os setores de economia, sociedade e ambiental. As máquinas antigamente, apesar da sua grande ajuda com a produção, não eram práticas e desenvolviam um grande esforço manual ainda dos trabalhadores, prejudicando até mesmo a saúde destes (PANTALEÃO, 2010).

O impacto ambiental é um fator muito discutido até hoje, pois, em sua maioria, o uso dessas máquinas resulta em um nível de poluição na atmosfera, no solo, nas águas e como consequência prejudica os seres vivos. Além disso, a geração de lixo e poluentes (líquidos e sólidos) é um fator muito preocupante para a sociedade atual. Estuda-se diversas alternativas para aperfeiçoar as máquinas e aprimorar estas tecnologias para causar cada vez menos impacto no ambiente e na sociedade, simultaneamente, aprimorando sua produtividade e eficiência (MARSON, 2014).

A construção civil vem se desenvolvendo ao longo dos anos, assim como, as obras que vêm se desenvolvendo e se aprimorando. Torna-se indispensável o crescimento e evolução nas obras com materiais de qualidade e mais eficientes possíveis, com propósito de trazer conforto e bem-estar para a sociedade. Construções de edifícios, rodovias, pontes, viadutos, barragens, portos e aeroportos são exemplos de como o desenvolvimento na construção civil teve aprimoramentos para simplificar a vida das pessoas nas cidades (CORRÊA, 2009).

Conjunto a isso, os materiais utilizados na construção civil também tiveram necessidade de evoluir e buscar a melhoria. O cimento é o produto mais utilizado na construção civil, atualmente existem diversas variedades e qualidades diferentes deste material. Assim, o cimento é um dos produtos mais consumidos no mercado,

conferindo uma dimensão estratégica à sua produção, buscando se sobressair na competição tecnológica e qualitativa do mercado e da comercialização (BASILIO, 1983).

Em específico na indústria da construção civil, um tema que recebe bastante atenção é a produção de clínquer, que constitui a principal matéria-prima para a produção de cimento. Para a produção de clínquer são utilizados fornos que atingem altas temperaturas a ponto de solubilizarem o material para a transformação de clínquer. Nesse processo é necessário que os fornos operem com temperaturas específicas para garantir a qualidade do material e não prejudicar os quesitos técnicos dos fornos (ANDRADE; PECCHIO; SANTOS; KIHARA, 2014).

Os combustíveis utilizados no processo de clínquerização em alto-fornos são classificados como fósseis ou alternativos. Os combustíveis fósseis são insumos minerais, do mesmo material que origina o petróleo, desta classificação utiliza-se o carvão mineral, o coque de alto enxofre, médio enxofre e baixo enxofre. Os combustíveis alternativos são os materiais sustentáveis que são reutilizados resíduos que compõem o lixo da sociedade, transformando lixo em forma de combustível e matérias-primas. Alguns exemplos destes materiais que são transformados em combustíveis são: pneus, caroço de azeitona, algodão e caroço de açaí (FREITAS; NÓBREGA, 2014).

Nesse sentido, o intuito de desenvolver clínquer de alta qualidade é entender os parâmetros técnicos contidos nos combustíveis nos fornos na produção de clínquer relaciona-se com os tipos de combustíveis, analisando a associação correta dos tipos de materiais com a proporção adequada de cada combustível, além de considerar que cada elemento possui seus próprios níveis de componentes químicos que impactam diretamente com a produtividade e o poder calorífico produzido nos fornos. Estes tipos de associações e combinações de combustíveis são chamados de MIX ou misturas (TILLMAN; DUNG; HARDING, 2012).

A partir do pressuposto da necessidade de aprimoramento de ampliação de tecnologias e de desenvolvimentos ambientais e também sociais, os critérios de qualidade devem ser feitos a partir das análises dos parâmetros técnicos dos combustíveis e inclusive dos combustíveis alternativos que atendem maior

porcentagem do mix de combustíveis utilizados em alto-fornos no processo de clínquerização. Desta forma, o objetivo deste trabalho é responder a questão abaixo.

**Como analisar os parâmetros técnicos dos combustíveis utilizados em fornos na produção de clínquer?**

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Analisar os parâmetros dos combustíveis fósseis e alternativos utilizados em fornos de uma empresa multinacional cimenteira.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Identificar os tipos de combustíveis utilizados na empresa;
- A partir da identificação dos tipos de combustíveis, avaliar quais são os parâmetros de cada combustível;
- Analisar os parâmetros que são utilizados pela empresa como critérios de avaliação de qualidade do combustível;
- Analisar os parâmetros técnicos dos combustíveis por uma viés sustentável.

## **1.3 Justificativa**

O presente trabalho se justifica na importância da produção nas fábricas cimenteiras terem mais produtividade afim de suprir a demanda no mercado no Brasil. Visto que a demanda do mercado na construção civil está cada vez maior e o mercado da indústria de cimento vem se demonstrando um setor intensamente competitivo.

A utilização de mistura de combustíveis no processo de queima é vantajosa pela multiplicidade de utilizar outras opções de materiais, visto que o forno possui uma restrição nas propriedades químicas e físicas dos materiais. Devido ao mix pode-se utilizar materiais com propriedades diferentes das requeridas pelo forno. Desta forma, pode-se analisar diretamente os parâmetros constituintes nos combustíveis para avaliar o produto final no processo de combustão (BATTAGIN, 2011).

A análise dos parâmetros dos combustíveis contribuem com a análise de qualidade do produto final e as vantagens econômicas, sociais e sustentáveis que a empresa pode ser beneficiada com a análise desses parâmetros, afim de garantir um melhor produto considerando os custos e disponibilidades térmicas dos combustíveis.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

A estrutura do trabalho foi realizada por tópicos sequenciais. A sequência é estabelecida visando situar o leitor sobre o tema, apresentando as informações e ideias relevantes no processo de estudo conforme o desenvolvimento do estudo.

Na introdução abrange-se a importância do tema ao processo de desenvolvimento do estudo. Aborda-se temas do segmento da indústria cimenteira e da construção civil e o processo de produção do clínquer, conjuntamente, demonstrando sua relevância no mercado, com isso, é conduzido tópicos apresentando a justificativa e objetivos do trabalho. Além disso é apresentado neste tópico a revisão de literatura e estrutura do trabalho.

No seguinte tópico, é apresentado a metodologia de conceitos teóricos dos materiais envolvidos no estudo (cimento Portland, clínquer, coque alto enxofre, coque baixo enxofre, carvão vegetal, materiais alternativos e alto fornos), assim como suas propriedades e características relevantes. Complementando o tópico, é abordado o processo de queima de alto fornos, o impacto ecológico, a proposta, utilização e explicação de mistura de combustíveis, assim como, suas vantagens e complementando aos temas, um breve estudo do cenário do mercado de combustíveis e a disponibilidade de material no cenário global.

Subsequentemente, a partir de dados coletados, é possível analisar as propriedades técnicas dos parâmetros, com ênfase nas propriedades que interferem diretamente a qualidade do produto final, ou seja, enfatizando os parâmetros que impactam diretamente no clínquer por estes apresentarem individualmente propriedades energéticas (obterem valores energéticos significativos).

Deste modo, é possível analisar os dados coletados relacionando aos valores coletados dos combustíveis da empresa com suas propriedades técnicas, os valores limites e padrões esperados e os valores do parâmetro de poder calorífico das misturas de combustíveis primários e alternativos apresentados. Assim como, analisar por meio de um viés sustentável justificando a quantidade utilizada de combustíveis alternativos.

Assim, o tópico de desfecho do estudo aborda a conclusão sobre o tema estudado, sua proposta final e as perspectivas futuras do trabalho desenvolvido.



## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste tópico será abordado os temas sobre o cimento, a indústria cimenteira, o processo produtivo de cimento nas fábricas de cimento, de maneira semelhante, será referido o tema do clínquer e seu processo de produção, com intuito de explorar o tema proposto pelo trabalho serão tratados os temas principais de pesquisa abordando e conceituando sobre os seguintes objetos: combustíveis, combustíveis alternativos, os parâmetros técnicos dos combustíveis, a relação deles com a qualidade do combustível, produtividade dos combustíveis e a utilização do mix de combustíveis.

### **2.1 Conceituação: O cimento e a indústria cimenteira**

As primeiras aparições de um material muito semelhante ao cimento aconteceu na construção das pirâmides do Egito, como grandes construtores, eles conseguiram explorar os limites construtivos de estruturas em rochas, assim aprimorando suas técnicas e manuseio com os materiais, tornando as construções grandiosas e com boa infraestrutura para seu tempo. A utilização do material com essa tecnologia, sendo usada em construções com rochas teve início por volta de 2750 a.C. no Egito. Os egípcios introduziram argamassas de cales e gesso na construção das pirâmides (LEA, 1998).

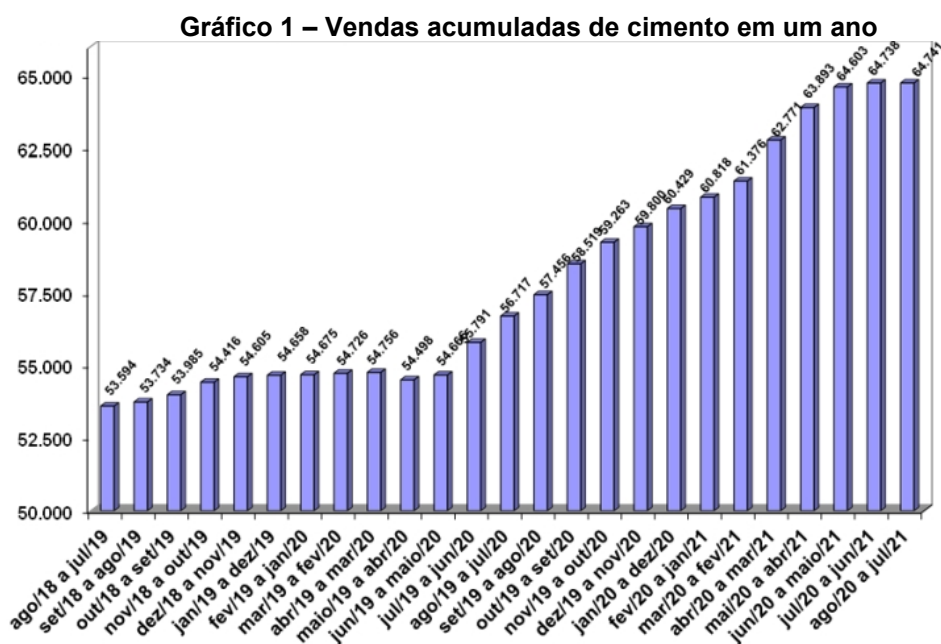
Posteriormente, os gregos melhoraram esses materiais e, por fim, os romanos produziram um cimento de notável durabilidade, ao acrescentar em cinzas vulcânicas às argamassas de argila e cal. Fizeram obras públicas como aquedutos e portos, e muitas delas resistiram ao tempo (BATTAGIN, 2011). Desde então, a descoberta foi se expandindo pelo mundo e foi se aprimorando até as variedades de cimento que temos atualmente, conjuntamente com a fabricação do concreto (HELENE; ANDRADE, 2010).

No Brasil, a indústria de cimento teve início após a chegada da revolução industrial no país, paralelamente, pode se associar seu início conjuntamente com as indústrias têxtil e alimentícias, as primeiras indústrias a se estabelecerem no Brasil (SANTOS, 2011).

Os primeiros registros de produção de cimento datam dos primórdios da indústria brasileira, em finais do século XIX, no Estado da Paraíba, apesar do funcionamento da unidade industrial por apenas três meses (SUZIGAN, 1972).

“O crescimento mundial vêm se desenvolvendo e as demandas no mercado, por consequência, também vêm crescendo significativamente. As indústrias no mercado da construção civil não é uma exceção dentro desse contexto, o consumo de cimento no Brasil aumentou no último ano mesmo com a pandemia. As vendas de cimento no Brasil em dezembro somaram 4,7 milhões de toneladas, um crescimento de 16,6% em relação ao mesmo mês de 2019, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento” (SNIC, 2021, p. 4).

Assim, a partir do gráfico 1 é possível identificar a venda acumulada de 12 meses de cimento no Brasil no mercado interno que deve ser considerada para analisar o cenário de necessidade do material na localidade.



Fonte: Adaptado de SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento) (2021)

O cimento Portland têm como principal constituinte o clínquer, material resultante da calcinação a aproximadamente 1450°C. A calcinação do material ocorre a partir de matérias-primas como calcário que corresponde de 75 a 80% da composição do material final e uma pequena parcela de argila de 20 a 25%. Em

conjunto a esses materiais, eventualmente é utilizado na composição do cimento corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera, com a finalidade de proporcionar a formação de compostos hidráulicos e conferir a propriedade ligante do material (BATTAGIN, 2011).

Segundo Zampieri (1989), o cimento Portland é obtido a partir da moagem do clínquer com uma ou mais formas de sulfato de cálcio, estas últimas empregadas em proporções que variam em massa de 3% a 5%, aproximadamente, com o objetivo principal de regular o tempo de pega ou endurecimento inicial do produto.

O quadro 1 apresenta algumas variedades do tipo de cimento Portland, suas nomenclaturas, classes e componentes (em porcentagens) que é utilizado como acréscimo no material com a finalidade de regular o tempo de pega ou endurecimento inicial do cimento.

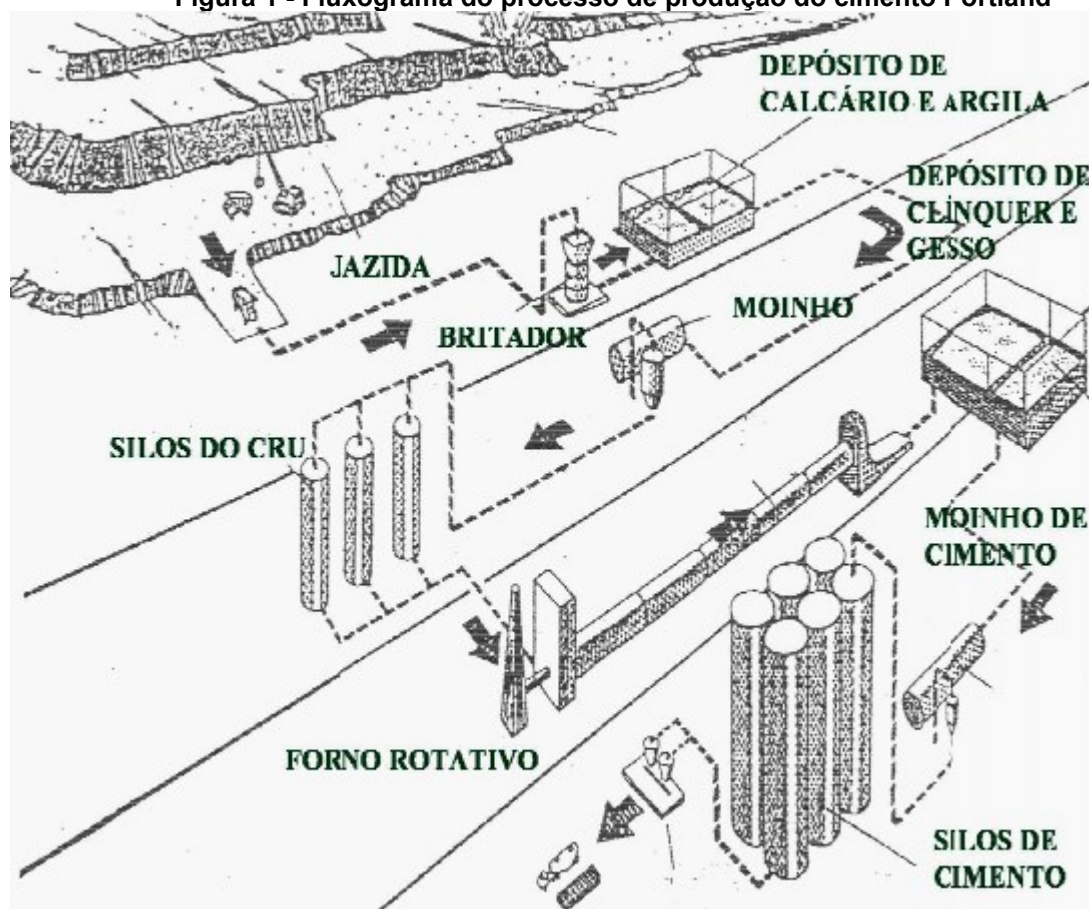
**Quadro 1 – Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil**

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Filler calcário
Comum	CPI	25,32,40	100	0	0	0
Comum com Adição	CPI-S	25,32,40	99-95	1-5	1-5	1-5
Composto com Escória	CPII-E	25,32,40	94-56	01/jun	0	0-10
Composto com Pozolana	CPII-Z	25,32,40	94-76	0	jun/14	0-10
Composto com Filler	CPII-F	25,32,40	94-90	0	0	6-10
Alto-Forno	CPIII	25,32,40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CPIV	25,32	84-45	0	15-50	0-5
Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	-	100-95	0	0	0-5
Resistente a Sulfatos	RS	25,32,40	-	-	-	-
Baixo Calor de Hidratação	BC	25,32,40	-	-	-	-
Branco Estrutural	CPB	25,32,40	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de BATTAGIN (2011)

O processo produtivo do cimento Portland acontece por etapas, que pode ser descrito na figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do processo de produção do cimento Portland



Fonte: Adaptado de KIHARA (1990)

O processo de produção tem início com a extração das matérias-primas das minas, são encaminhados para o processo de britagem, para chegar em uma granulometria de 0,05 mm para seguir para o moinho (de bolas ou vertical), então, o produto é transformado em uma farinha fina (farinha de cru) e após isso, é armazenado em silos (BATTAGIN, 2011).

Assim, a farinha inicia seu primeiro processo na etapa da torre do ciclone, onde percorre de uma temperatura média de 58°C até 440°C aproximadamente. Na segunda etapa do processo, a máxima temperatura atingida é por volta de 650°C (BATTAGIN, 2011).

Assim, passa por uma terceira etapa onde a temperatura atinge 770°C aproximadamente. Na quarta e última etapa na torre de ciclone, a temperatura final atinge 900°C aproximadamente. Assim, a farinha aquecida pode passar pelo processo de clinkerização em altos fornos, onde pode atingir até 2000°C e no processo final de saída do forno a temperatura situa-se em torno de 1450°C, após isso, passa pelo processo de resfriamento e é armazenado em galpão, seguindo novamente para a

moagem, agora como produto final o clínquer. Após a moagem, adiciona-se a escória, gesso e material pozolânico para obtenção do produto final o cimento Portland (BATTAGIN, 2011).

## **2.2 Clínquer e o processo de clinquerização**

Clínquer é o produto proveniente da fusão das matérias-primas calcário e argila que são extraídas das jazidas, ou também chamadas de minas. Onde, eventualmente também são acrescentadas materiais corretivos (minério de ferro, bauxita, areia, etc.). A mistura, após ter passado pelo processo de britagem, pré-homogeneização, moagem e homogeneização, podendo ser armazenado em silos. Assim, o produto que agora se encontra em estado de farinha fina após o processo de moagem, onde a granulometria é adequada para o processo de clinquerização (na fusão em altos fornos, onde passa por um processo de alta temperatura), a finura torna o material mais suscetível a capacidade de retenção de calor. Deste modo, o material passa por um processo de clinquerização, onde realiza-se a fusão desta farinha em altos fornos ou também chamados de fornos de alta temperaturas (LIMA, 2011).

Por esses fatos, pode-se entender mais detalhadamente o processo de moagem do material até o produto final ter valores característicos de finura, a importância dessa granulometria para o cimento é dada pela relação da finura com a trabalhabilidade do material, de modo que, o comportamento reológico e desempenho mecânico do cimento em composições com argamassas e concretos (BATTAGIN, 2011).

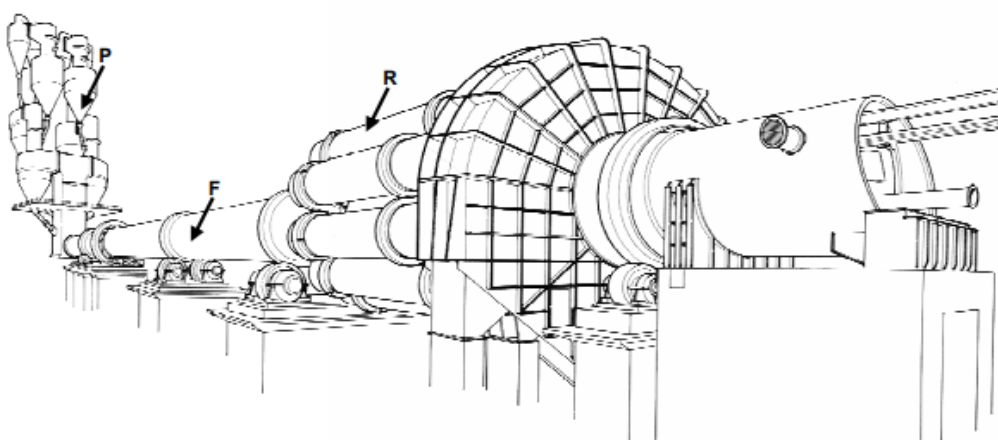
Na fotografia 1 é possível visualizar a característica física do material apresentado.

**Fotografia 1 – Nódulos de clínquer**

Fonte: CO (2006)

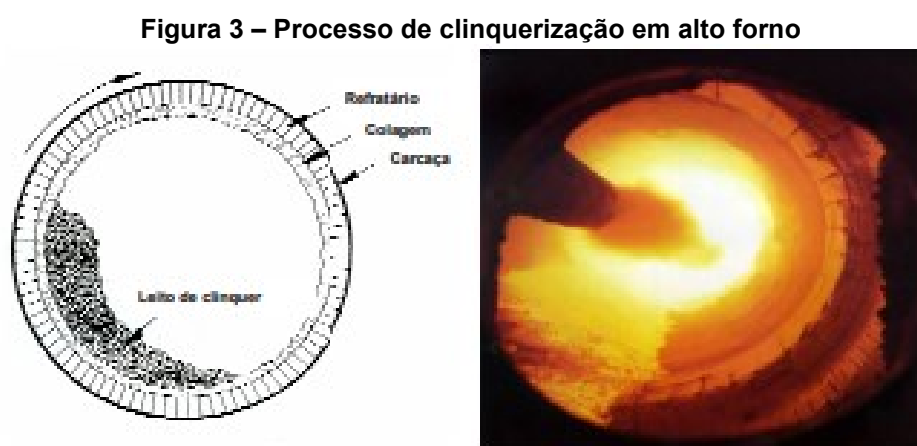
Segundo Arnaldo Forti Battagin (2011), em escala industrial, para se obter o clínquer Portland, desenvolve-se uma operação complexa que consiste na extração e britagem das matérias-primas, seguindo-se à preparação adequada da mistura crua (farinha), isto é, moagem e homogeneização, com posterior queima por volta de 1450°C em forno rotativo, seguida de resfriamento no resfriador industrial.

Assim, a visualização do processo dentro do forno de clínquer pode ser obtida na figura 2, onde mostra o esquema do forno e seus equipamentos técnicos complementares. O esquema na fotografia demonstra um forno de clínquer (F) com pré-aquecedor (P) e resfriador de satélite (R).

**Figura 2 – Esquema de forno de clínquer**

Fonte: DUDA (1985)

Semelhantemente, no intuito de obter melhor entendimento do funcionamento do processo dentro do forno de clínquer, a figura 3 mostra o esquema do forno e seus equipamentos técnicos complementares representando um desenho demonstrativo de corte transversal do forno (esquerda) e foto do interior do forno (direita)



Durante a fabricação do clínquer, deve-se certificar em sua composição química estejam contidos os óxidos principais do clínquer  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Quando estes componentes não estão presentes na mistura, deve-se dosar as quantidades de matérias-primas (calcário e argila) em quantidades previamente calculadas, ponderando para que a dosagem requerida de óxidos seja atendida. Afim de garantir o quimismo (proporção específica pré-estabelecidas de determinados compostos químicos da mistura) da farinha e a homogeneidade do clínquer, garantindo um material com características mais constantes possíveis (CENTURIONE, 1993).

### 2.3 Combustíveis

Os combustíveis utilizados no processo de fusão do clínquer em altos fornos é caracterizado por sua alta capacidade de geração de calor no processo de combustão, por essa razão, são usados para a queima no processo de clinquerização em alto fornos. As variedades mais comuns de combustíveis existentes que foram utilizados ao longo dos anos são carvão mineral, carvão vegetal, carvão alternativo (sustentável), óleo e coque de petróleo (BATTAGIN, 2011).

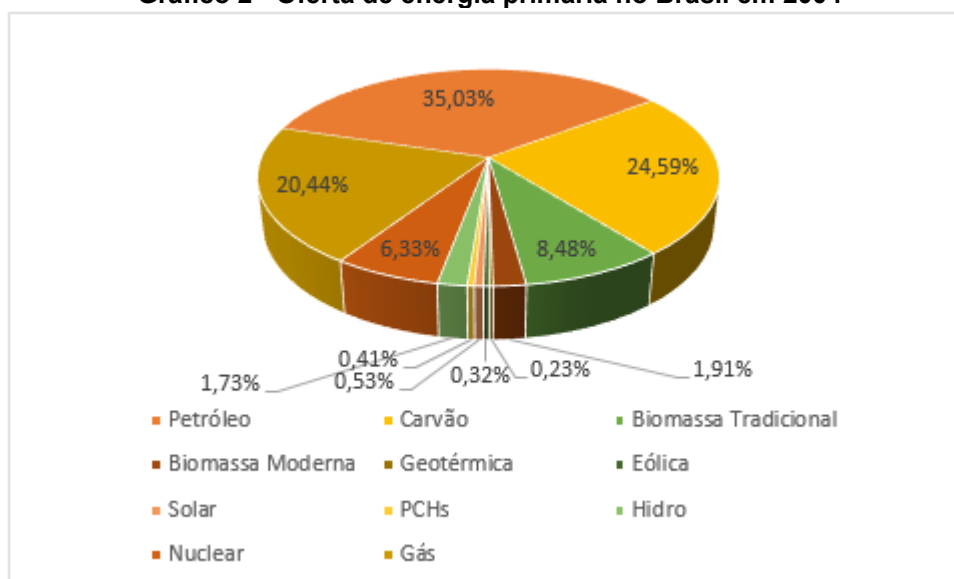


Além dos combustíveis fósseis que representa 80% da energia produzida no mundo, provenientes do petróleo, existem outras variedades de fonte de energia que somadas representam 10% da produção mundial, como a energia nuclear, energia hidroelétrica e as fontes renováveis de energia (solar, eólica, geotérmica e pequenas centrais hidroelétricas) que apesar da sua pequena participação no Brasil, são as alternativas de fontes sustentáveis e benéficas ambientalmente (GOLDEMBERG, 2009).

Assim, dos outros 10% restantes de produção de energia mundial são originadas da biomassa, onde, 8,40% sob a forma de biomassa tradicional usada de forma primitiva, não sustentável, pelas populações carentes da África, Ásia e parte da América Latina, que derrubam as árvores para aquecer ambientes e cozinhar. Os restantes 1,91% eram usados como formas modernas de energia, com intuito de gerar eletricidade ou para a produção de carvão vegetal ou até mesmo para a produção de etanol, um excelente combustível com octanagem maior do que a gasolina, porém, mais sustentável, por não apresentar impurezas como particulados e óxidos de enxofre (GOLDEMBERG, 2009).

O gráfico 2 demonstra a distribuição da oferta de energia primária no Brasil em 2004 considerando os tipos disponíveis de energia. Considerando que as energias Biomassa Tradicional, Biomassa Moderna, Geotérmica, Eólica, Solar, PCHs (Pequenas Hidrelétricas) e Hidroelétrica são fontes de energia renováveis, representando 13,61% de toda distribuição de energia disponível em 2004, sendo 3,4% novas formas de energias renováveis.

**Gráfico 2 - Oferta de energia primária no Brasil em 2004**

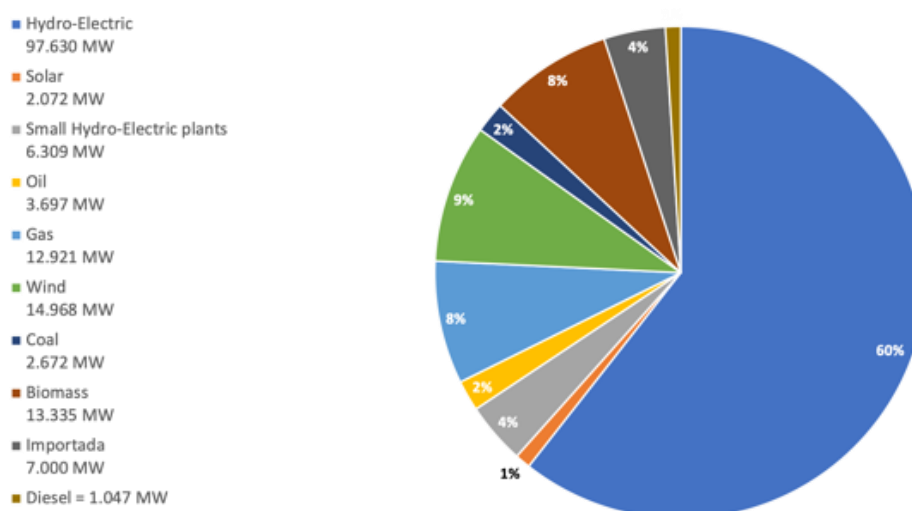




Fonte: Adaptado de GOLDEMBERG (2007)

É possível identificar no gráfico 3 que o carvão é considerado uma alternativa de combustível que é pouco utilizado em vista das outras alternativas de geração de energia, apesar de serem altamente utilizados em fábricas de cimento, aço e metalúrgica.

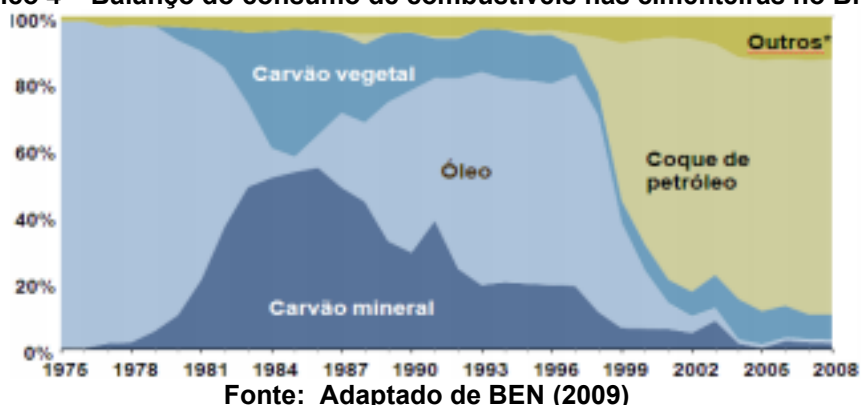
Gráfico 3 - Consumo de combustíveis no mercado global em 2019



Fonte: Adaptado de Statisa (2019)

No gráfico 4 a seguir, é possível identificar o percentual do consumo que é utilizado em fábricas cimenteiras como geração de energia em fornos.

**Gráfico 4 – Balanço do consumo de combustíveis nas cimenteiras no Brasil**



Os combustíveis que são utilizados na fábrica de estudo deste trabalho são o coque de petróleo, classificados por coque alto enxofre e coque baixo enxofre, o carvão vegetal e os combustíveis alternativos (ou coque verde), chamados de combustíveis alternativos.

O coque de petróleo é um subproduto dos processos de refino do petróleo. As utilizações do coque de petróleo ocorrem nas indústrias de alumínio e aço, além da utilização em fornos nas indústrias cimenteiras. No processo de fusão nos fornos um fator desfavorável é a emissão de gases poluentes devido à quantidade de enxofre na composição do material, resultando em um alto custo para a empresa para controlar emissões atmosféricas prejudiciais (SALOMAN, 2001).

Com isso, uma opção mais econômica e ambientalmente viável seria o uso materiais sustentáveis na mistura de outros tipos de combustíveis com a finalidade de ser uma alternativa no processo de combustão nos fornos como gerador de calor. Podendo ser utilizado na mistura com outros combustíveis, por combustíveis de petróleo terem melhor poder de geração de calor, podendo ter a capacidade de atingir maiores temperaturas (FREITAS; NÓBREGA, 2014).

### 2.3.1 Coque

Segundo Loison, Foch, Boyer (1989), o coque é originado de materiais orgânicos sedimentados, estes são classificados como diversas variedades de plantas e algas e suas composições, como galhos, folhas, cascas, troncos, cascalhos, entre

outros. Estes materiais decompostos em específicos estão localizados em ambientes aquáticos ou com presença de água, por isso, apresentam constituintes minerais, formando uma composição principal que origina o material coque. A decomposição destes materiais são feitos pelas ações de bactérias e fungos.

De acordo com o mesmo autor, as características do coque dependem das condições de decomposição e das condições geológicas. Podendo variar as condições na decomposição em: paleoclima, paleogeográficas, se houve a movimentação da matéria decomposta, a presença de sal, água e o PH, a presença de bactérias aeróbicas e anaeróbicas ou até mesmo de fungo. As condições geológicas variam se: existem reservas que captam constituintes, se o assentamento da composição orgânica é feita de modo rápido ou demorado, se existe proteção do local e se há movimentos tectônicos.

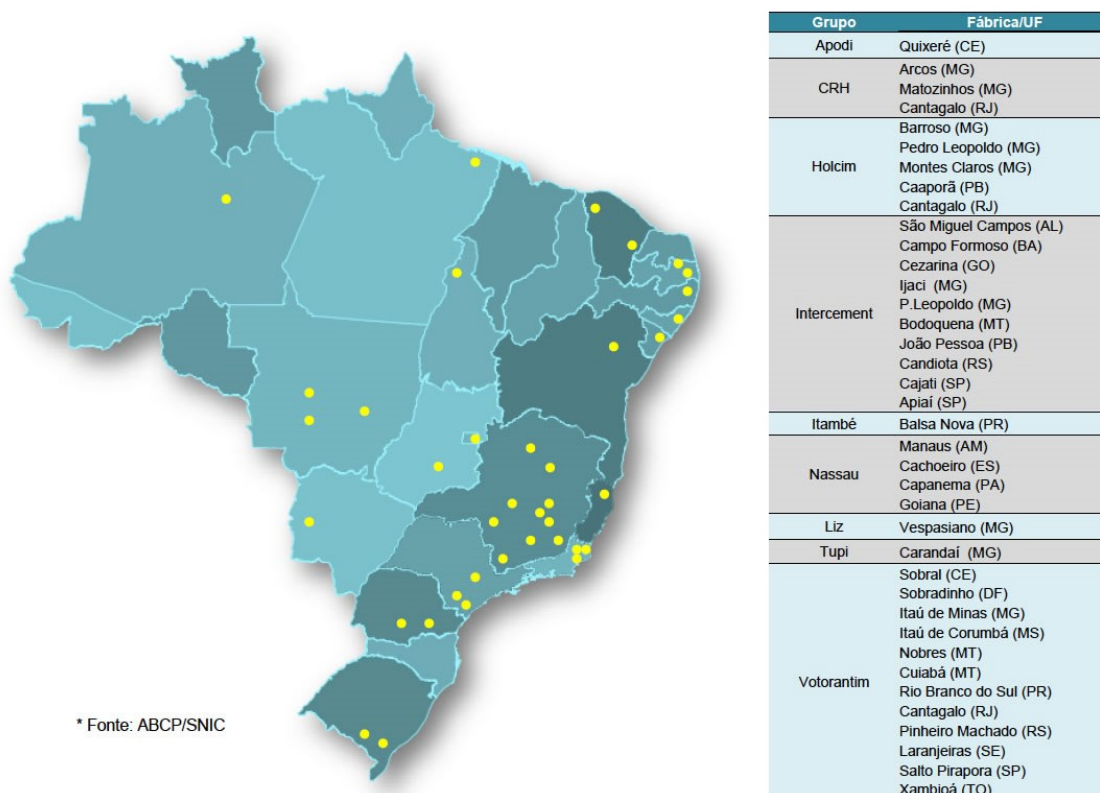
Desta forma, a decomposição destes materiais ocorrem por diversas etapas, onde o processo principal é realizado após uma catagênese, onde há o aumento de pressão e temperatura. Com isso, ocorrem modificações no material, diminuindo os níveis de hidrogênio e de oxigênio e também da volatilidade do material (LOISON; FOCH; BOYER, 1989).

## **2.4 Combustíveis Alternativos**

### **2.4.1 Histórico do coprocessamento**

O início das ações de coprocessamento de resíduos industriais aconteceu na década de 1990, no Estado de São Paulo e o processo se ampliou para outras regiões do país, estendendo-se a 17 estados e o Distrito Federal que hoje executam o coprocessamento em fábricas apropriadas e com estruturas apropriadas conforme exigem as legislações e normas do coprocessamento (SATO, 2002). A figura 4 apresenta as unidades de coprocessamento disponíveis no Brasil em 2019.

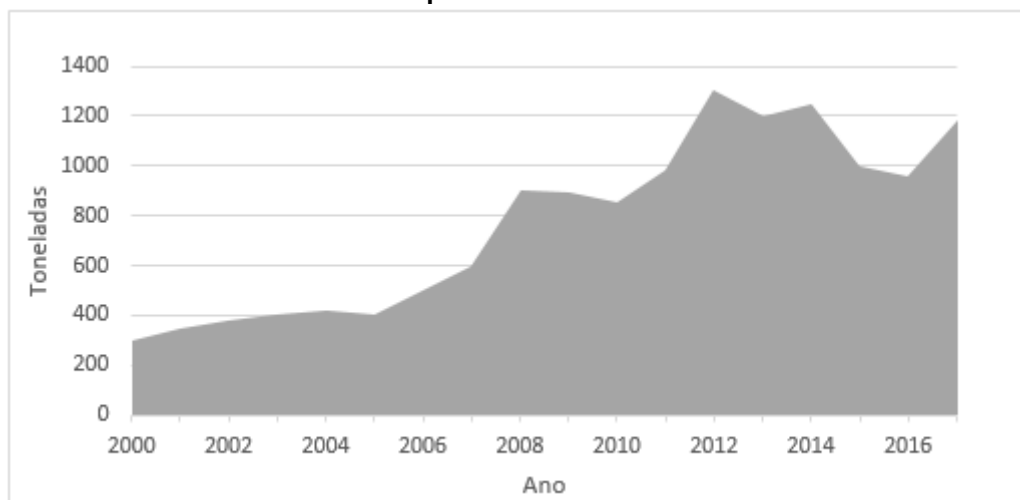
**Figura 4 – Unidades de coprocessamento no Brasil**



**Fonte: ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland); SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento) (2019)**

Os materiais utilizados como combustíveis e matéria-prima no processo de clínquerização são classificados de duas formas: os materiais fósseis e os materiais sustentáveis (resíduos alternativos). Segundo Goldenstein; Azevedo (2006), “Há algumas décadas, a indústria vem atuando no sentido de reduzir as emissões de gases pelos veículos, visando atender as crescentes exigências ambientais.” Com esta proposta, houveram alterações nas composições de mix utilizados nas fábricas cimenteiras, em especial no que se refere à utilização de combustíveis alternativos.

Dados de 2017, comparando resultados desde 2000, a destruição de resíduos em fornos de cimento constata-se um aumento da quantidade de utilização de resíduos ao longo destes anos com um grande avanço a partir de 2006. Os dados de 2017 mostram uma média de utilização de resíduos em coprocessados de aproximadamente um volume de 1200 toneladas. No gráfico 5 é possível identificar a quantidade de resíduos coprocessados em fornos de cimento durante a produção de clínquer nas fábricas cimenteiras no Brasil de 2000 a 2017.

**Gráfico 5 – Acúmulo de resíduos coprocessados em fornos de cimento de 2000 a 2017**

Fonte: ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) (2019)

A implantação do coprocessamento como forma de substituição de combustíveis e matérias primas utilizadas em fábricas cimenteiras trouxe uma proposta alternativa com maior ênfase em sustentabilidade financeira, por ser uma alternativa mais econômica e vantajosa ambientalmente com seus benefícios de redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Esta solução tecnológica possibilita a utilização de resíduos que seriam inutilizados, evitando assim a disposição destes em aterros, gerando, trazendo também benefícios sociais.

#### 2.4.2 Combustíveis alternativos

Os materiais alternativos ou também chamados de resíduos coprocessados são obtidos da unidade de produção onde são armazenados. O material demanda da realização de etapa de coprocessamento, que é uma tecnologia que representa uma destinação adequada e ambientalmente correta de resíduos que não puderam ser reciclados. Este processo conta com o gerenciamento de resíduos que são capazes de realizar o reaproveitamento energético nos fornos (Votorantim Cimentos, 2019).

Segundo Battagin (2011), os materiais que podem ser coprocessados para serem fontes de energia alternativa devem estar devidamente licenciadas pelas empresas responsáveis. São eles:

- Solos contaminados;
- Pneus e Emborrachados;
- Resíduos Líquidos e Pastosos;
- Resíduos Sólidos;
- Biomassa.

“A atividade de coprocessamento é regulamentada através da Resolução CONAMA 264/99, que proíbe os seguintes tipos de resíduos: domiciliares brutos, de serviços de saúde, explosivos, radioativos, organoclorados, agrotóxicos e afins. O uso de fornos de clínquer como opção para os resíduos citados apresenta uma série de vantagens dentre as quais podemos citar:

- baixo custo para a destruição dos resíduos;
- economia de combustível convencional no processo;
- conservação de fontes energéticas não renováveis;
- incorporação das cinzas geradas no processo de combustão dos resíduos ao clínquer, eliminando a necessidade de disposição destas cinzas, quando geradas em processos de incineração convencionais” (FERRARI, 2002, p. 4)

Conforme CONAMA (1999), os materiais coprocessados possuem capacidade de substituição térmica e/ou substituição de matéria-prima dos combustíveis, desde que as propriedades dos materiais coprocessados apresentem as propriedades técnicas apropriadas no Teste de Queima proposto para a correta substituição do combustível.

Dessa forma, de acordo com Battagin (2011), o material coprocessado será capaz de substituir termicamente o combustível desde que o ganho de energia seja comprovado. Assim como, o material poderá ser substituído como matéria-prima desde que suas propriedades sejam semelhantes aos componentes empregados na combustão de clínquer, tal como, possuir características mineralizadores e/ou fundentes.

Segundo Goldenstein; Azevedo, (2006), p. 4 “Os derivados do petróleo foram os principais combustíveis utilizados nos veículos automotores no decorrer de todo o século XX. No entanto, outros combustíveis e tecnologias vêm sendo estudados, e a tendência é que o petróleo perca, progressivamente, sua prevalência, sendo substituído por outras fontes energéticas existentes ou ainda não viabilizadas. Tudo indica que as próximas décadas marquem o fim da era dos combustíveis fósseis. E, ao contrário das perspectivas do século passado, esse evento não decorrerá da exaustão das reservas, mas da própria dinâmica econômica capitalista e das crescentes limitações ambientais.”

Segundo CONAMA (1999), Art. 4º A quantidade de resíduo gerado e/ou estocado, deverá ser suficiente para justificar sua utilização como substituto parcial de matéria prima e/ou de combustível, no sistema forno de produção de clínquer, após a realização e aprovação do Teste de Queima.

Com base no artigo da CONAMA (1999), o resíduo pode ser utilizado como substituto de combustível, para fins de reaproveitamento de energia, desde que o ganho de energia seja comprovado.

Orth (2002) define que o coprocessamento é uma técnica de destruição, em fornos de clínquer, de resíduos industriais devidamente licenciados, que será utilizada como substituição energética e/ou substituição de matéria-prima.

Segundo Siqueira (2005), o uso de resíduos industriais tem se mostrado uma opção econômica e ambientalmente viável para uso como fonte de calor, justificada pelas limitações de combustíveis naturais encontradas atualmente no mercado. Com isso, as indústrias de processamento têm incentivado pesquisas sobre fontes alternativas de geração de calor. Um caminho viável para o uso a fim de que as indústrias cimenteiras diminuam seus custos é o uso de alguns resíduos industriais como combustível secundário na produção de cimento.

Conforme a Votorantim Cimentos (2021), o coprocessamento é uma tecnologia reconhecida mundialmente como a destinação adequada e ambientalmente correta de diferentes tipos de resíduos, não utilizados na reciclagem, com reaproveitamento energético nos fornos da indústria de cimentos. Esses resíduos e biomassas substituem o coque de petróleo, que é um combustível fóssil. Essa substituição auxilia na redução de emissões de gases de efeito estufa tanto durante a produção de cimento quanto no processo de decomposição dos resíduos, que deixam de ir para os aterros.

Desse modo, pode-se definir a técnica de coprocessamento como um procedimento de destruição térmica do material, onde é realizado o seu reaproveitamento e o material tem como resultado uma queima mais sustentável, sem geração de gases poluentes e um método de reduzir os resíduos em aterros, facilitando sua decomposição de forma que não gere nenhum tipo de poluição para o planeta (FREITAS; NÓBREGA, 2014).

Segundo CONAMA (1999), o termo Coprocessamento de resíduos em fornos de produção de clínquer tem por sua definição dada por: Técnica de utilização de

resíduos sólidos industriais a partir do processamento desses como substituto parcial de matéria-prima e / ou de combustível no sistema forno de produção de clínquer, na fabricação de cimento.

As premissas que devem ser cumpridas para a utilização dos resíduos sólidos como combustíveis alternativos são: as qualidades dos parâmetros dos seus constituintes e do setor ambiental que não deve ser afetada; devem ser cumpridas as normas e condições de licenciamento ambientais, assim como deve-se ter um controle da emissão de gases; e o processo de produção não deve ser afetado (KIRSCH, 1992).

Os benefícios da utilização deste material são a substituição energética sustentável, reaproveitamento de matérias-primas e a redução de custo, por terem resultados de geração de calor semelhantes ao coque de petróleo, porém, mais econômicos (FREITAS; NÓBREGA, 2014).

Segundo Ribeiro (2000), as diversas cimenteiras utilizam resíduos como insumos alternativos, obtendo uma economia equivalente a um milhão de toneladas de carvão anuais.

Diretamente, existem benefícios em utilizar materiais alternativos (são empregados como matérias-primas) na mistura de combustíveis (materiais com alto poder calorífico e conseqüentemente alto poder de eficiência energética). A função dos materiais coprocessados como matérias primas entram como forma sustentável por não gerarem tantos gases poluentes por provocarem um maior controle da queima, a inexistência das cinzas no processo de combustão, reduzirem a retirada de materiais explorados dos recursos não renováveis e reduzirem o desmatamento causado para a produção dos combustíveis fósseis e salientando a retirada dos resíduos agrícolas da natureza que geram grandes volumes em aterros que por sua grande quantidade orgânica podem contaminar os solos e o lençol freático (OFICIMEN, 1998).

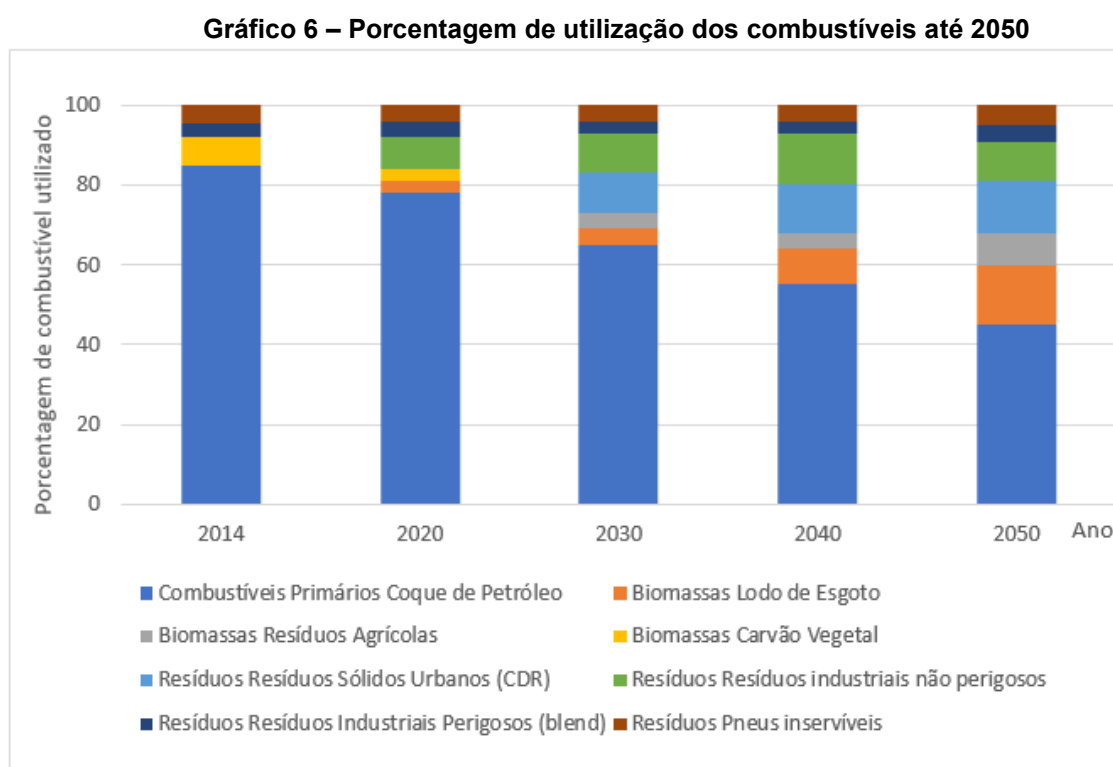
### **2.4.3 Potência de coprocessamento no Brasil**

Considerando o potencial do Brasil em aumentar a capacidade da técnica de coprocessamento para os próximos anos, apesar de não ter dados oficiais sobre a geração de resíduos no país, inventários de órgão ambientais mostram que anualmente



são gerados cerca de 110 milhões de toneladas de resíduos de classe II (não inertes) (GARCIA *et al.*, 2003). O potencial econômico, industrial e tecnológico das fábricas cimenteiras apontam que há possibilidades de aumentar o coprocessamento nos próximos anos (SATO, 2004).

Desta forma, o gráfico 6 demonstra um prospecto da utilização de combustíveis alternativos para até 2050, sendo os principais materiais classificados como resíduos, biomassas e combustíveis fósseis.



**Fonte: ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) (2019)**

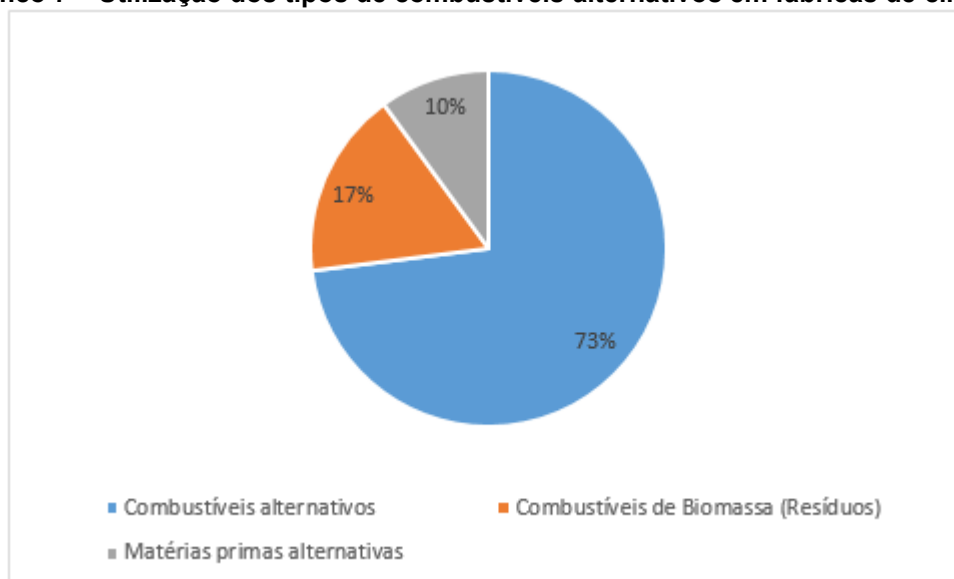
No Brasil, existem empresas terceirizadas e inseridas em fábricas cimenteiras, que são especialistas em gerenciamento de resíduos para coprocessamento com a finalidade de utilização na produção do clínquer. Estas empresas geralmente também executam a manipulação, o transporte e a análise qualitativa dos parâmetros dos resíduos. A mistura dos diversos resíduos para utilização no coprocessamento geralmente é realizada nesta etapa.

#### 2.4.4 Classificação de combustíveis alternativos

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland, ABCP, (2019), “em 2017, do total de resíduos coprocessados utilizados, os combustíveis alternativos representaram 90% e as matérias-primas alternativas 10%, em toneladas, correspondendo a um índice de substituição térmica de 11,9%.”

Desta forma, é possível analisar três tipos de classificações gerais de fontes alternativas de combustíveis utilizados para substituir o combustível primário em fornos que são os combustíveis alternativos, matérias primas alternativas e os combustíveis de biomassa (resíduos). A distribuição de quantidade percentual dos combustíveis alternativos que são utilizadas no Brasil pode ser visualizado no gráfico 7 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2019).

**Gráfico 7 – Utilização dos tipos de combustíveis alternativos em fábricas de cimento**

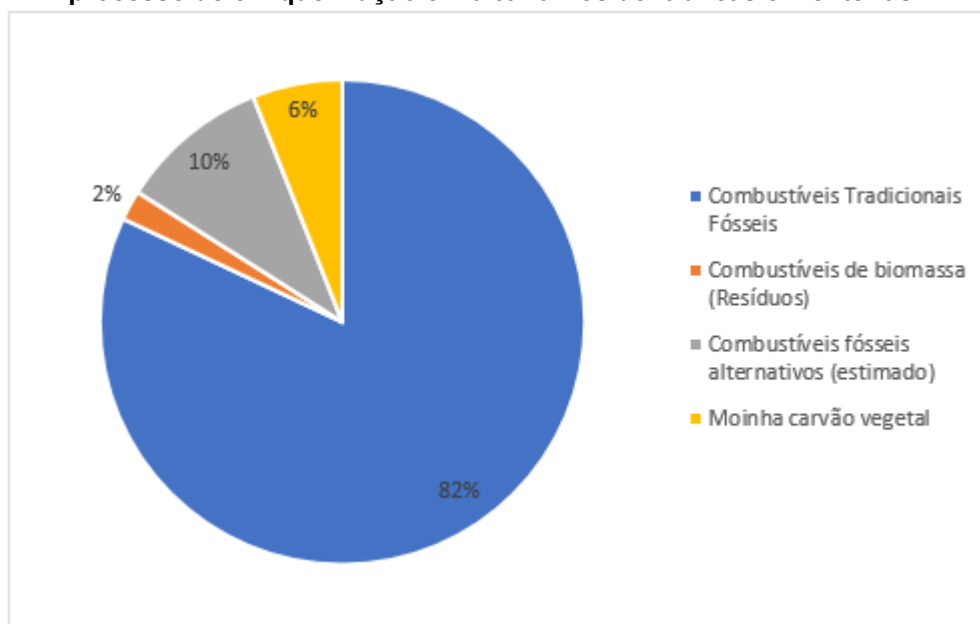


**Fonte: ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) (2019)**

Segundo dados da Associação Brasileira de Cimento Portland, ABCP, (2019), a utilização dos combustíveis tradicionais fósseis representa 82% do poder calorífico utilizado para a produção de clínquer, principal componente responsável pela geração de energia (térmica) do processo. Em segundo lugar dos combustíveis mais utilizados foram: os combustíveis fósseis alternativos em 10%, moinha de carvão vegetal em 6%

e em menor quantidade representativa são utilizados os combustíveis de biomassa (resíduos) em 2%, como representa o gráfico 8.

**Gráfico 8 – Representação percentual do poder calorífico dos combustíveis presente no processo de clinquerização em alto fornos de fábricas cimenteiras**



**Fonte: ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) (2019)**

Os combustíveis alternativos apresentados acima destacam-se os pneus usados e a mistura dos resíduos de classe I (perigosos), estes materiais são tratados antes de serem utilizados, mas geralmente são originados de resíduos industriais. Outros exemplos desses materiais, porém, utilizados em menores quantidades são serragem, solos contaminados e solventes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2019).

Desta forma, a utilização de resíduos como matéria prima na fabricação do cimento reduz o impacto ambiental e prolonga a vida útil das jazidas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2019). São exemplos destes materiais utilizados como matéria prima: cavaco de madeira, resíduos agrícolas orgânicos e lama de esgoto.

Por último, segundo a Associação Brasileira de Cimentos Portland, ABCP (2019), “os combustíveis oriundos de resíduos de biomassa representam 9% em poder calorífico (kcal/kg) dos resíduos com potencial energético dos combustíveis alternativos

utilizados como coprocessamento”. Estes materiais são originados de solos contaminados, resíduos de construção e siderúrgicos.

As classificações das origens dos resíduos podem ser duas: resíduos agrícolas e resíduos industriais. Este último, deve ter um cuidado em particular, por suas variedades de componentes químicas que podem acabar prejudicando o processo ou até mesmo ambientalmente.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, (2004), classificou os resíduos sólidos por meio de normas com a finalidade de padronizar nacionalmente suas nomenclaturas e procedimentos:

NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação;

NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos – Procedimento;

NBR 10006 – Solubilização de Resíduos – Procedimento;

NBR 10007 – Amostragem de Resíduos – Procedimento.

Segundo a NBR 10004 (2004), os resíduos foram classificados como:

Resíduos Classe I – perigosos;

Materiais da Classe I são classificados como perigosos quando apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, provocando riscos à saúde pública. Conforme o procedimento da NBR 10005, o procedimento de tratamento que deve executar nestes materiais é a lixiviação se superiores ao teor de poluentes no extrato lixiviado classificado na lista 7 (Limite Máximo no Extrato obtido no Teste de Lixiviação) (SATO, 2004).

Resíduos Classe II – não inertes;

Materiais da Classe II são os resíduos que não se enquadram na classificação de materiais perigosos ou inertes. Geralmente, estes materiais apresentam propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água (SATO, 2004).

Resíduos Classe III – inertes.

Materiais da Classe III são os resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que se submetidos ao teste de solubilização, não possuem constituintes solubilizados (SATO, 2004).

## **2.5 Parâmetros técnicos dos combustíveis**

Segundo Santos (2007), as propriedades dos materiais são avaliadas em laboratórios onde são executados laudos técnicos, as seguintes propriedades devem ser avaliadas:

- Umidade (seca e úmida);
- Quantidade de cinzas;
- Teor de Enxofre;
- HGI – nível de dureza;
- Volatilidade do material;
- Poder calorífico.

De acordo com Diez (2002), um fator predominante para a qualidade do material é sua granulometria, relacionando a granulometria com os parâmetros do combustível é possível identificar o grau de combustão do material e se é possível atingir altos níveis de temperatura. Outro fator que a granulometria deve ser levada em consideração é a presença dos parâmetros nas micropartículas do material e quanto sua distribuição, também quanto sua resistência a quebras e a abrasão. De modo prático, geralmente é considerado uma faixa de 50 a 55 mm para um nível ótimo de granulometria.

Para a identificação da qualidade do material, os valores requeridos no ensaio de laboratório devem estar de acordo com as normas referentes (dispostas no quadro 2). Outra característica que pode ser utilizado na qualidade do material é a produtividade que possui na queima nos fornos, calculadas durante o processo.

**Quadro 2 - Normas das análises de ensaio das características físico-química dos combustíveis**

ANÁLISE E ENSAIOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS CARVÕES E MISTURAS		
ANÁLISES E ENSAIOS	CONTEÚDO	MÉTODO
ANÁLISE IMEDIATA	CINZA	ASTM - D - 3174
	MATÉRIA VOLÁTIL	ASTM - D - 3175
	ENXOFRE	ASTM - D - 2492
	UMIDADE	ASTM - D - 3174

Fonte: Adaptado de Silva, Destro, Marinho e Assis (2011)

A partir dos ensaios realizados no combustível é possível identificar a qualidade do material para a queima do processo de clínquerização. A qualidade do material também pode ser analisada pelas características de cada parâmetro do combustível.

Segundo Diez (2002), baseado em alguns estudos anteriores, resumiu-se alguns requisitos dos parâmetros do coque (Tabela 1) com a finalidade de criar uma faixa padronizada de qualidade do coque para a operação de clínquerização em alto-fornos na Europa (LEONARD *et al.*, 1996; GROßPIETSCH *et al.*, 2000).

**Tabela 1 – Requisitos dos parâmetros dos combustíveis em alto-fornos na Europa**

Chemical property	European range
Moisture (wt.%)	1–6
Volatile matter (wt.% db)	<1.0
Ash (wt.% db)	8–12
Sulphur (wt.% db)	0.5–0.9
Phosphorous (wt.% db)	0.02–0.06
Alkalies (wt.% db)	<0.3

db = dry-based.

Fonte: Leonard *et al.* (1996)

A tabela 1 demonstra os valores que são utilizados como faixa padrão na Europa, no Brasil são utilizadas outras unidades de medida e outros critérios de avaliação, considerando que os materiais utilizados variam.

### 2.5.1 Material Volátil

Loison, Foch e Boyer (1989) diz que o Material Volátil é um dos mais importantes parâmetros do combustível, pois é responsável pela carbonização de uma

quantidade do material durante o processo da queima, liberando gases do combustível como hidrogênio, monóxido de carbono e metano, assim como também libera CO<sub>2</sub> e o vapor da água. Consequentemente, o material volátil é responsável pela perda de peso do material conforme o processo de carbonização acontece e pela quantidade de gás que é liberado.

Os laudos de análise dos combustíveis são classificados a partir de duas perspectivas, se o coque estiver úmido, como resultado será feita a análise do material volátil (base úmida – “*dry ash-free basis*”). De maneira semelhante, se o material for previamente secado a uma temperatura de 105°, a análise será do material volátil (base seca – “*dry basis*”).

Diez (2002) afirma que é possível identificar que a qualidade do combustível deve ser levada em consideração os graus de temperatura que a combustão pode chegar, porém, para altos níveis se considera perigoso com riscos de explosão. Deve ser considerado um nível de material volátil baixo, onde o parâmetro que é responsável pela carbonização (matéria química principal responsável pela combustão). De acordo com Loison; Foch; Boyer (1989), o nível de material volátil deve ser controlado para alcançar temperaturas de até 900° (considerando um coeficiente de variação de 10%).

### **2.5.2 Poder calorífico**

Loison, Foch e Boyer (1989) admite que o poder calorífico é um parâmetro do combustível classificado internacionalmente. Este parâmetro é classificado com base no combustível livre de cinzas, mas a capacidade de umidade é presente em sua composição onde a umidade em equilíbrio com a atmosfera tem 96% de umidade relativa em uma temperatura ambiente de 30°C.

Conforme Francesquett *et al.* (2011), o poder calorífico é avaliado quando o combustível atinge a combustão completa (carbono é convertido em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e hidrogênio convertido em água (H<sub>2</sub>O)) em uma temperatura de 18°C ou 25 °C e 760 mmHg de pressão (RUSSEL, 1994; HILSDORF *et al.*, 2004; AL-GHOUTI, AL-DEGS & MUSTAFA, 2010).

De acordo com Loison, Foch e Boyer (1989), o método consiste em medir o aumento da temperatura durante a completa combustão de uma quantidade específica de combustível em uma atmosfera de oxigênio com um calorímetro de bomba de volume constante com um condensador de formação de água, chamando assim de valor de “*gross calorific*” (poder calorífico bruto).

O poder calorífico líquido é calculado a partir do poder calorífico bruto, em uma pressão constante e um volume variável sem a condensação da água (DIEZ, 2002).

Segundo as práticas industriais, percebeu-se que os critérios referentes à temperatura, é um influenciador para garantir a temperatura que os materiais podem alcançar durante a queima. Em dias de alta temperatura, a queima pode alcançar mais facilmente elevados graus. Neste caso, deve-se controlar a quantidade de materiais combustíveis por possuírem alto poder calorífico. Já em dias mais frios, o processo é inverso. A combustão não tem facilidade em alcançar elevadas temperaturas, com isso, é necessária uma maior porcentagem de materiais de alto poder caloríficos.

De maneira semelhante, a umidade causa uma dificuldade em alcançar elevadas temperaturas. Em dias úmidos tem-se necessidade de aumentar a porcentagem de materiais de alto poder calorífico.

### **2.5.3 Cinzas, enxofre e umidade**

Alguns dos materiais presentes nos combustíveis afetam a performance do procedimento de combustão e do processo energético em altos fornos. Por essa razão, preferencialmente devem estar presentes em menor quantidade possível. Estes materiais são chamados de materiais impuros. São classificados como umidade, cinzas, enxofre, material volátil, fósforo e materiais álcalis (DIEZ, 2002).

A cinza é um componente do coque não produtiva que influencia no volume e na composição do material. Sua influência após a combustão pode causar danos nos altos fornos se em grande quantidade. Por isso, em experiências na Indústria indica que a cada 1 wt. % de aumento de cinza no combustível reduz a produção do metal



de 2 ou 3 wt. %. Valores acima de 10 wt. % só são aceitáveis se a composição química da cinza for atendível (DIEZ, 2002).

O enxofre é um componente muito presente nos combustíveis, encontrado em diversos tipos de materiais pelo mundo. O enxofre pode ser apresentados de duas formas: como componentes minerais ou orgânicos relacionados com o hidrogênio. Pode-se obter uma análise relacionada a cada forma como é apresentado ou uma análise total do enxofre. Depois de oxidar os gases sulfitos, o sulfato é estimado a partir da precipitação como sulfato bário. Este é um método muito utilizado em muitos países (LOISON; FOCH; NOYER, 1989).

O método moderno preferido em alguns países ocorre por meio de uma incineração em alta temperatura de uma pequena amostra de combustível. Esse método se tornou famoso devido a rapidez do processo e por isso, tornou se um método padrão (NF M 03-038). A amostra é inserida em uma temperatura que atinge entre 1200 a 1250°C com presença de fosfato de ferro com 1300-1350°C de temperatura na presença de alumínio. Assim, o dióxido e o trióxido de enxofre formado são absorvido em peróxido de hidrogênio e sua concentração é determinada por acidimetria, logo, a dedução é formada a partir do ácido clorídrico que é formado se o combustível conter cloro (LOISON; FOCH; NOYER, 1989).

A análise do enxofre pode ser feita de duas formas, a primeira e mais antiga é chamada de Método Eschka em que uma amostra é queimada em conjunto com carboneto de potássio (ou carboneto de sódio) e magnésia afim de consertar a forma que os gases sulfatos e sulfitos são formados (DIEZ, 2002).

De acordo com Diez (2002), existem impurezas presente nos combustíveis que afetam a performance da combustão em fornos altos, diminuindo sua capacidade de queima e desempenho energético, devido ao efeito de baixa dos níveis de carbono disponíveis para uso direto e funções de redução indireta, assim como sua função de suporte permeável.

Segundo mesmo autor, as impurezas que prejudicam o processo de queima são: umidade, material volátil, cinzas, enxofre, fósforo e álcali componentes. O nível desses produtos deve ser considerados baixos.

A cinza, por exemplo, é um material derivado da queima do combustível, originado de materiais classificados como resíduos perigosos. Por sua vez, a cinza também é classificada como um resíduo perigoso resultante da queima. Todavia, a cinza é um material que pode ser incorporado na massa de clínquer produzido, logo, este resíduo pode ser eliminado no processo de fabricação do cimento (FERRARI, 2002).

Assim sendo, estas propriedades químicas, enxofre, cinza e as demais propriedades químicas componentes do combustível são particularmente importante por influenciarem na produtividade do combustível em altos fornos quando em grandes quantidades, por esta razão, estes materiais são aceitáveis produtivamente quando em pequenas porcentagens (DIEZ, 2002).

#### **2.5.4 Parâmetros influenciados por ações externas**

Segundo Gandra, Reis e Fernandes (2015), os critérios que interferem na definição da porcentagem do MIX utilizados nas fábricas são feitos por diversos tipos de fatores que interferem nas condições de queima do produto conforme mencionado anteriormente, são eles os principais:

- Especificações técnicas do forno;
- Temperatura externa;
- Grau de umidade externa;
- Material gerador de energia térmica com alto poder calorífico;
- Quantidade de matéria-prima para incineração.

As especificações técnicas do forno variam de tipos de fabricação e seu tempo de uso. Por esse motivo, de acordo com Gandra, Reis e Fernandes (2015), há necessidade de interferências na permeabilidade do volume do forno e prognosticar ações corretivas ao longo do uso do forno, como: (i) aprimoramento de distribuição de cargas; (ii) alteração na base de coque; e, (iii) modificações do posicionamento do coque durante a descarga dos materiais.

Análises empíricas em indústrias identificaram alguns parâmetros diferentes no processo de combustão quando em diferentes temperaturas externas. Quando a temperatura ambiente é mais elevada, há uma maior facilidade de alcançar maiores níveis de temperatura de combustão. Já em temperaturas mais baixas, há uma maior dificuldade de alcançar mais facilmente de maiores temperaturas, utilizando-se, então de maior quantidade de materiais com maior nível de combustão e geradores de energia.

A umidade, da mesma forma que a temperatura externa, também influencia nas condições térmicas do forno. A umidade é um fator inversamente proporcional à combustão, quanto maior quantidade, mais dificuldades existem na geração de energia para a queima (MOREIRA; LIMA; GOULART, 2012)

Assim sendo, uma importante análise de como a combustão deve ocorrer em alto fornos é escolher o mix (mistura) dos combustíveis que deve ser utilizado levando em considerações as condições citadas acima: especificações técnicas dos fornos, temperatura e umidade externa e levar em consideração a composição energética do material para não dosar alto nível de energia térmica quando pode-se usar dosagens com materiais menos eficientes energéticos (como materiais coprocessados) para não atingir níveis muito elevados para os fornos, podendo ser prejudicial no processo.

### **2.5.5 Produtividade**

A produtividade é um índice de desempenho que ocorre em um sistema de produção, é definido como a relação entre o que foi produzido e os insumos utilizados em um certo período de tempo. De modo geral, é um instrumento auxiliar na detecção de problemas e de análise de desempenho dos sistemas de produção (MOREIRA, 1991).

Os parâmetros de análise do processo de queima do mix (mistura) de combustíveis nos fornos de clínquer são as propriedades técnicas (ou químicas dos materiais utilizados na mistura), o tempo de duração do processo até chegar no produto final (clínquer) e a medição da quantidade de toneladas (MOCHIZUKI, 2017).

### 2.5.6 Utilização de misturas de combustíveis do MIX

Com base em Carpio, Silva e Jorge (2003), nas indústrias de cimento o coque pode ser usado isoladamente, ou em uma mistura com o óleo combustível, carvão mineral ou gás natural, para a combustão no forno rotativo. O coque não possui material volátil bastante para produzir uma chama autossustentável e como resultado disto, apresenta alguma dificuldade para ser queimado sozinho em um forno de clínquer.

Segundo Ramos (2017), na escolha dos materiais para a mistura de combustíveis é considerado a partir da mistura de diferentes resíduos industriais compatíveis, com o objetivo de formar um produto homogêneo, com suas propriedades físico-químicas constantes.

Os pneus são altamente utilizados como materiais alternativos na composição do mix (mistura) de combustíveis por sua inutilidade e seu tempo considerável de decomposição, são considerados combustíveis de alta qualidade, quando comparados ao carvão de melhor qualidade. A quantidade de enxofre encontrada nos pneus está entre 0,5 e 2,0 %, geralmente menor ou igual à maioria dos carvões e coque de petróleo. Além disso, os pneus contêm metais como chumbo, cádmio e zinco. Os níveis de metais pesados situam-se em uma faixa de concentração que permite que sejam facilmente incorporados ao clínquer (SALOMON, 2001).

A utilização de mix na combinação de combustíveis em fornos de clínquer traz vantagens ocasionando o cimento se sobressair em razão da concorrência do mercado sua variedade no uso de combustíveis, dispondo de alternativas para o uso de material, vantajoso para potencializar a mistura dos materiais que possuem propriedades individuais benéficas e de alto desempenho, onde sua associação contribui no complemento desses materiais com finalidade de aprimorar o material de combustão para o forno de clínquer. Outro fator que pode ser vantajoso para a fábrica são as opções de alternativas para uso do material, útil em circunstâncias onde há falta de material no mercado ou quando o valor de compra do material é muito elevado (CARPIO; SILVA; JORGE, 2003).

### 3 METODOLOGIA

Neste tópico serão analisadas as características da pesquisa bibliográfica e todas as bases de informações obtidas na pesquisa, com isso, o intuito da pesquisa é situar o cientista com informações sobre o tema em estudo (LAKATOS; MARCONI, 1996).

Segundo Richardson *et al.* (2007), a pesquisa é classificada quanto ao método e à forma de abordar o problema. Como complemento, Gil (2007) classifica quanto aos objetivos e aos procedimentos.

Nesse contexto, o presente trabalho aborda o problema de pesquisa de forma qualitativa por considerar em sua análise os conceitos que ocorrem nas operações da fábrica de estudo (NEVES, 2016).

O método qualitativo define-se por ter uma abordagem de levantamento que permite a explicação de porquês das questões e hipóteses identificadas, logo, possibilitando ainda a elaboração de um questionário (LAKATOS; MARCONI, 1996).

Quanto a classificação dos procedimentos adotados na coleta de dados, utilizou-se da revisão de literatura como referência para a busca e desenvolvimento desta pesquisa, assim, foi realizado um estudo de caso na fábrica (GIL, 2017).

No próximo tópico será descrito o objeto de estudo deste trabalho.

#### 3.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo caracteriza por ser uma empresa de grande porte e atua na área de produção de cimento e complementares (argamassa, rejunte, concreto, acabamentos, agregados, plastificantes, entre outros).

A empresa do estudo tem origem nacional, uma das principais empresas multinacionais, como também, é a maior empresa da indústria de cimentos no Brasil. Atuando em 19 países e presente na maioria dos continentes do mundo, se tornou uma consolidadora global (MARTIGNAGO, 2014).

Para realização da pesquisa de estudo, foram escolhidas 14 fábricas, nas quais utilizam os dois tipos de combustíveis, alternativos e primários, que foram estudados na pesquisa. As fábricas são localizadas nas quatro regiões do país, onde 2 fábricas são localizadas na região Sul, 3 fábricas na região Sudeste, 3 fábricas na região Nordeste e 6 fábricas na região Centro-Norte (região caracterizada pela empresa entre a região Centro-Oeste e Norte).

Segundo dados disponibilizados pela empresa, em 2020, as vendas de cimento e complementares, como rejuntas, argamassas, impermeabilizantes entre outros, gerou um lucro de aproximadamente 4 milhões de reais sem considerar os juros, impostos, depreciações e amortizações. Considerando a venda de aproximadamente de 30 milhões de toneladas de cimento em 9 países de operações. Estes dados correspondem um aumento dos últimos anos e a empresa considera os resultados de venda e lucros de 2020 como o melhor ano em relação aos últimos dez anos.

### **3.2 Caracterização da área de estudo**

O estudo de caso foi realizado na fábrica cimenteira em uma empresa multinacional, onde o principal objeto de estudo foi realizado nas principais fábricas do Brasil que utilizam os combustíveis de estudo no processo de clínquerização em alto fornos: coque alto enxofre e baixo enxofre, carvão e materiais coprocessados.

O local de estudo é caracterizado pela influência da agropecuária, o que é um forte influente na economia do país. Por isso, existe uma grande diversidade de plantações de diferentes segmentações, mas com ênfase alimentar. Com isso, a grande quantidade de sementes de diversos tipos de plantas, grãos como o milho (assim como a palha, o sabugo e a espiga), feijão, cereais como o arroz e outros tipos de composições da agricultura assim como o próprio solo que ao ser contaminado por diversos tipos de agrotóxicos acaba se tornando inutilizado.

A empresa de estudo desse trabalho, beneficia os trabalhadores locais viabilizando empregos com diversos tipos de serviços desde os produtores de matérias primas e os materiais que serão coprocessados, abrangendo até mesmo os serviços

de produção na fábrica até na venda do produto final. Até mesmo após o processo pós-venda, onde não tem mais a influência da empresa, há o impacto econômico e de empregabilidade nos cidadãos em diversas regiões do país, pois atinge serviços externos, como serviços em construções e obras de todos portes.

De modo geral, a agricultura é uma grande produtora de resíduos, pois com sua grande produção também leva a ter grandes excedentes que não podem ser utilizados. Com isso, o coprocessamento de resíduos agrícolas é uma operação ambientalmente muito favorável que destina um grande volume que não poderia ser reciclado, mas é reaproveitado energeticamente nos fornos da indústria de cimento substituindo os materiais de origem fósseis (não-renováveis).

As diversas regiões do país, por apresentarem climas e temperaturas diferentes, caracterizam por suas diferentes utilizações de combustíveis e este impacto também é notável nas possibilidades de materiais coprocessados.

### **3.3 Procedimentos metodológicos**

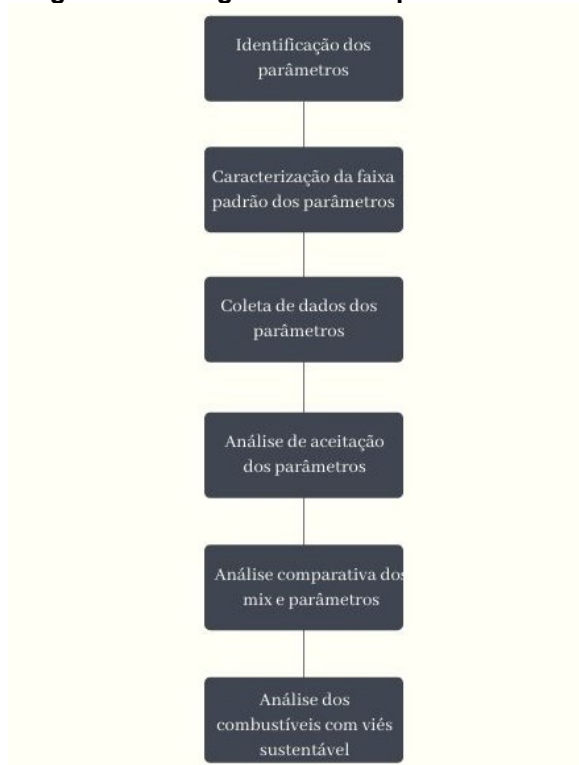
Neste tópico são apresentados as etapas e processos que foram desenvolvidos no período durante o mês de agosto a novembro de 2021 nas 14 fábricas de cimento da empresa de estudo.

As análises dos parâmetros técnicos dos combustíveis foram realizadas a partir dos materiais de estudo: coque alto enxofre, coque baixo enxofre, carvão e materiais coprocessados.

Assim, foram realizadas as análises comparativas baseadas nos parâmetros principais dos combustíveis: poder calorífico, material volátil e enxofre. A comparação foi feita entre os parâmetros e sua relação com a proporção percentual de cada combustível na composição do mix.

A análise quanto ao combustível alternativo traz uma consideração com viés sustentável, com a finalidade de complementar a principal função e vantagens de sua utilização.

Deste modo, as análises foram realizadas pelas seguintes etapas definidas no fluxograma (Figura 5):

**Figura 5: Fluxograma das etapas de estudo**

**Fonte: Autoria Própria (2021)**

Etapa 1: Identificação de quais parâmetros dos dois tipos de combustíveis são utilizados como critérios de avaliação da qualidade dos combustíveis;

Etapa 2: Definição da faixa limite (para combustíveis primários) ou os valores esperados padrão (para combustíveis alternativos) dos parâmetros dos combustíveis. Estes valores são definidos pelo comitê técnico da empresa através de ensaios testes de combustão dos materiais e através destes ensaios são definidos quais valores dos parâmetros atendem ao processo esperado;

Etapa 3: Coleta de dados de 14 fábricas da empresa de diversas regiões no Brasil, na qual são definidos através de ensaios em laboratórios, realizados pela empresa, os valores dos parâmetros (poder calorífico, cinzas, umidade e cloro) dos dois tipos de combustíveis (alternativos e primários);

Etapa 4: Para cada parâmetro encontrado é realizado uma análise comparativa com os critérios de valores aceitos (faixa limite e valores esperados) para avaliar se os combustíveis utilizados nas fábricas atendem aos valores requisitados pela empresa, segundo o critério de qualidade passado pelo comitê técnico da empresa;



Etapa 5: A partir dos dados percentuais que são utilizados no mix (combinação dos dois tipos de combustíveis, primários e alternativos, em uma mistura para ser utilizado no processo de combustão do clínquer), realiza-se uma comparação dos percentuais de cada combustível do mix com o seu valor individual de poder calorífico. Assim, é feito uma análise da parcela que é utilizada de poder calorífico com sua porcentagem na mistura.

Etapa 6: Os valores percentuais dos combustíveis utilizados no mix também é justificado pelos benefícios sustentáveis e ambientais. Assim, na última etapa é feito uma análise dos parâmetros técnicos dos combustíveis a partir de uma avaliação sob um viés sustentável.

Deste modo, o próximo tópico abrange os resultados das análises e avaliações realizadas no principal objeto de estudo deste trabalho.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Identificação dos combustíveis primários e alternativos

Os combustíveis que são usados como recursos capazes de gerar calor e potência térmica e energética para o processo de clínquerização em alto fornos têm sua principal característica verificar quanto a qualidade do material. A qualidade do material afeta diretamente na produção do clínquer, e também, é diretamente relacionada aos parâmetros técnicos constituintes dos combustíveis (LOISON; FOCH; BOYER, 1989).

Os materiais utilizados são responsáveis pela interação de geração de energia térmica que alcançam alto valor energético (até aproximadamente 2000°C), cujo calor é capaz de interferir no processo de queima do material até seu produto final.

Os combustíveis utilizados na fábrica de estudo são o coque alto enxofre, coque baixo enxofre, carvão e os combustíveis alternativos coprocessados. Estes materiais apresentam uma classificação mais abrangente, na qual pode ser definido os tipos de materiais a partir de uma categoria. A classificação desses materiais são apresentados da seguinte forma:

- Coque alto enxofre;
- Coque baixo enxofre;
- Carvão mineral;
- Resíduos sólidos natural da moinha;
- Resíduos sólidos biomassa;
- Resíduos sólidos derivado do pneu picado;
- Resíduos sólidos mistura RT 50 – resíduos industriais;
- Resíduos sólidos naturais da biomassa;
- Resíduos sólidos naturais de resíduos agrícolas;
- Resíduos sólidos naturais de resíduos de solo contaminados;
- Material coprocessado;
- Material coprocessado do lodo de ETE (estação de esgotos) industriais.

A empresa de estudo apresenta os principais materiais que são utilizados na substituição dos combustíveis fósseis, estes materiais são presentes em diversas regiões do país e sua disponibilidade está de acordo com o clima, geografia da região e da distribuição agrícola da região. Pelo fato do Brasil ser um país de diversidades geográficas e climatológicas, há muitas variedades de resíduos utilizados para o coprocessamento. Os resíduos são misturados com a finalidade de obter uma mistura de material alternativo para substituir os combustíveis no processo.

Os combustíveis utilizados na empresa variam conforme disponibilidade do mercado, com isso, os materiais acima apresentam as classificações dos combustíveis de forma generalizada. Assim, analisando os resíduos disponíveis, é possível identificar os tipos de materiais que são utilizados na empresa de forma específica:

- Borra
- Briquete de Arroz
- Briquete de serragem
- Caroço de açaí
- Caroço de açaí seco
- Carvão mineral
- Casca de arroz
- Casca de castanha
- Catalisador
- Cavaco
- CDRU
- Coco babaçu
- CSS
- CSS 40
- DREGS
- Finos de coque
- Grits
- Lama neutralizada
- Lodo
- Moinha

- Moinha moída
- Palha de arroz
- Palha de milho
- Pó de exaustão
- Pó de tinta
- Pó de varredura
- Resíduo Líquido
- Resíduo Líquido sem PCI
- Resíduo pastoso
- RGC
- RT
- RT 50
- Semente
- Serragem
- Soja
- Solo
- Solo contaminado
- Torta neutralização

Os combustíveis alternativos são utilizados conforme a disponibilidade do mercado, ou seja, somente se houver matéria-prima disponível para venda/compra que o resíduo pode ser utilizado pela empresa. Estas variações também dependem das regiões do país. Em determinadas regiões, por suas características econômica, geográfica, climática e social, apresentam tipos diferentes de combustíveis tanto alternativos quanto para os primários.

Os combustíveis alternativos podem ser classificados por regionais por duas características muito essenciais: áreas industriais ou agrícolas e pelo âmbito de disponibilidade do material, seja pela abundância no mercado (ou falta de procura para muita demanda), ou pela facilidade do acesso ao material (localização próxima, oferta do material por terceiros).

O quadro 3 dispõe os materiais alternativos que são utilizados na empresa dispostos por seu emprego em cada regional da empresa no Brasil: SU (Sul), SE (Sudeste), NE (Nordeste) e CN (Centro-Norte).

**Quadro 3 – Análise da disponibilidade dos combustíveis alternativos por regional**

<b>Regional</b>	<b>Combustíveis alternativos utilizados</b>
SU	Carvão Mineral, Casca de Arroz, Catalisador, Cavaco, CDRU, Cinzas, CSS, CSS 40, DREGS, GRITS, Lodo, Palha de Arroz, Pó de exaustão, Pó de tinta, Pó de Varredura, Resíduo Líquido, Resíduo Pastoso, RT 50, Semente, Soja, Solo Contaminado, Torta Neutralização
SE	CDRU, RT, MOINHA, RT 50, Pó de Varredura, Finos de coque, Cavaco, Resíduo Líquido
NE	Borra, Carço de Açaí, Cavaco, Lama Neutralizada, Lodo, Moinha, RGC, RT 50, Solo
CN	Briquete de Arroz, Cavaco, Moinha, Palha de Arroz, RGC, RT 50, Serragem, Soja, Solo Contaminado

**Fonte: Autoria Própria (2021)**

As características climáticas da região impactam também na caracterização da escolha dos tipos de materiais alternativos, devido ao clima frio, por exemplo, pode ser que tenha mais ofertas de sementes do que de biomassa de arroz. Logo, a característica agrícola em razão ao clima da região, podem ofertar diferentes tipos de resíduos.

Dessa forma, avaliando as características dos combustíveis primários considerando os tipos de materiais por suas diferenças regionais, pode se levar em consideração a disponibilidade do mercado (externo e interno). Os materiais utilizados pela empresa são obtidos pelas refinarias de extração dos materiais, dessa forma, é necessário que tenha oferta pelo mercado.

O quadro 4 dispõe os combustíveis primários que são utilizados na empresa dispostos por seu emprego em cada regional da empresa no Brasil: SU (Sul), SE (Sudeste), NE (Nordeste) e CN (Centro-Norte).

**Quadro 4 – Análise da disponibilidade dos combustíveis primários por regional**

<b>Regional</b>	<b>Combustíveis primários utilizados</b>
SU	Coque Alto Enxofre
SE	Coque Alto Enxofre e Coque Baixo Enxofre
NE	Coque Alto Enxofre, Coque Baixo Enxofre e Carvão
CN	Coque Alto Enxofre, Coque Baixo Enxofre e Carvão

**Fonte: Autoria Própria (2021)**

O combustível coque alto enxofre é um produto importado, pois os produtos exteriores apresentam maior disponibilidade (quantidade), melhor qualidade e menor valor comparado aos produtos nacionais. Já o coque baixo enxofre, é obtido por refinarias nacionais que conseguem disponibilizar o material nas fábricas mais longes dos portos (interiores do país). Assim, deve se levar em consideração para distribuir a quantidade de volume utilizado a localização da fábrica quanto às origens dos coques, ou seja, os portos e as refinarias.

#### **4.2 Análise de desempenho dos combustíveis**

Os resíduos, assim como os combustíveis fósseis, passam por análises dos seus parâmetros técnicos. Em especial, para os resíduos industriais deve ter uma análise crítica de seus componentes químicos para não afetarem os fornos e nem ao processo de produção em termos de toxicidade, corrosão, patogenicidade e reatividade. Desta maneira, em uma análise geral, somente resíduos combustíveis com um alto valor energético e baixos conteúdos de cloro e metal são utilizados em alto fornos em fábricas cimenteiras (MANTUS, 1992).

#### 4.2.1 Valores esperados dos parâmetros utilizados pela empresa

Os parâmetros utilizados na empresa apresentam valores padrões ou uma faixa limite permitida requeridas dos combustíveis estabelecidos pelo comitê técnico da empresa, apresentados nos quadros 5 e 6. Estes valores foram classificados por meio de ensaios, quando ultrapassados destes limites apresentaram erros durante o processo em alto fornos. Desta forma, quando os materiais conseguem atingir os valores padrão, para o caso dos combustíveis alternativos ou se enquadram na faixa limite permitida, no caso dos combustíveis primários, assim é possível permitir a utilização dos materiais no processo de combustão em alto fornos.

**Quadro 5 – Parâmetros percentuais técnicos dos principais exemplos de combustíveis primários**

<b>Parâmetro</b>	<b>Limites de quantidade</b>	<b>Unidade</b>
<b>Poder Calorífico</b>	Superior 8400	Kcal/kg
<b>Umidade</b>	7% - 12%	%
<b>Material Volátil</b>	8% - 15%	%
<b>Enxofre</b>	Máximo 1,5%	%
<b>Cinzas</b>	Máximo 0,50%	%
<b>HGI (dureza)</b>	Mínimo 60	-

Fonte: Aatoria Própria (2021)

Os dados apresentados como valores esperados são obtidos a partir de um valor padrão previamente calculado e um limite de segurança, ou também chamado de limite de erro. Esses valores alteram conforme os tipos de resíduos e os materiais utilizados na combinação das misturas. Assim como, podem variar pelas condições regionais, conforme o clima, características agrícolas ou disponibilidade do material. Por isso, os materiais apresentados no quadro 6 apresentam classificações regionais CN (Centro-Norte), SE (Sudeste), SU (Sul) e NE (Nordeste) nos dados esperados em cada parâmetro.

**Quadro 6 – Parâmetros percentuais técnicos dos principais exemplos de combustíveis alternativos**

<b>Regional</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valor esperado</b>	<b>Unidade</b>
<b>SU</b>	<b>Poder Calorífico</b>	3250	Kcal/kg
	<b>Umidade</b>	25	%
	<b>Cinzas</b>	26	%
	<b>Cloro</b>	0,49	%
<b>SE</b>	<b>Poder Calorífico</b>	3750	Kcal/kg
	<b>Umidade</b>	27	%
	<b>Cinzas</b>	27,5	%
	<b>Cloro</b>	0,5	%
<b>NE</b>	<b>Poder Calorífico</b>	3330	Kcal/kg
	<b>Umidade</b>	24	%
	<b>Cinzas</b>	25	%
	<b>Cloro</b>	2,7	%
<b>CN</b>	<b>Poder Calorífico</b>	4330	Kcal/kg
	<b>Umidade</b>	28	%
	<b>Cinzas</b>	29	%
	<b>Cloro</b>	0,4	%

Fonte: Autoria Própria (2021)

Os parâmetros contidos nos combustíveis por meio de análises impactam diretamente nos fatores técnicos como influência de cinza, enxofre, metais e cloro. Estes parâmetros técnicos, conforme abordados anteriormente, podem ser corrigidos com aditivos ou utilizando procedimentos químicos antes, durante ou após o processo de combustão para não prejudicar o produto final nem os altos fornos.

Analisando outros parâmetros como a cinza, não impactam diretamente na produção do clínquer, por poder utilizar o material para a produção de cimento, na qual utilizada a cinza como um aditivo.

Os materiais que são classificados como perigosos, ou denominados como contaminados, podem ser tratados utilizando, por exemplo, o procedimento de lixiviação através de um processo erosivo no solo provocado a partir da lavagem da camada superficial do solo pelo escoamento das águas superficiais.

O poder calorífico é o parâmetro principal responsável pela geração energética no processo, e deve ser utilizados na análise de combustíveis com a finalidade de obter valor energético e assim garantir a efetividade na produção do clínquer em altos fornos.



Os combustíveis apresentados neste estudo são mix (misturas) realizadas a partir de uma combinação de cada classificação de combustível (alternativos e primários), desta forma os dados demonstrados neste trabalho de combustíveis alternativos são o mix (mistura) já executada a partir dos materiais alternativos, de forma semelhante para os combustíveis primários (materiais fósseis). Estes dados foram coletados, com a finalidade de demonstrar valores dos parâmetros técnicos dos combustíveis primários e dos combustíveis alternativos (resíduos coprocessados).

## **4.2.2 Combustíveis primários**

### **4.2.2.1 Parâmetro Poder Calorífico**

O quadro 7 demonstra os dados referente ao valor em quilocaloria por quilograma (Kcal/kg) do parâmetro de Poder Calorífico dos combustíveis primários (coque alto e baixo enxofre e carvão) nas 14 fábricas dispostas em diferentes localizações no país classificadas em suas regionais.

Os dados foram retirados a partir de laudos técnicos obtidos por ensaios laboratoriais. Os dados que não foram possíveis determinar foram classificados na tabela como ND (não determinados).

**Quadro 7 – Parâmetros técnicos dos combustíveis primários – Poder Calorífico (Kcal/kg)**

<b>Fábrica</b>	<b>Regional</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>
<b>1</b>	<b>SU</b>	7674	7711	7935
<b>2</b>		7674	7711	7935
<b>3</b>	<b>SE</b>	8776	8749	8642
<b>4</b>		ND	ND	8393
<b>5</b>		8752	8690	8693
<b>6</b>	<b>NE</b>	ND	ND	8752
<b>7</b>		ND	ND	8752
<b>8</b>		ND	ND	8752
<b>9</b>	<b>CN</b>	8800	8393	8752
<b>10</b>		ND	ND	ND
<b>11</b>		ND	ND	ND
<b>12</b>		8648	8630	8642
<b>13</b>		ND	ND	8841
<b>14</b>		ND	ND	8693

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Os dados de poder calorífico se enquadram nos valores requeridos pela empresa demonstrados no quadro 5 (valores parâmetros da faixa limite para poder calorífico) que solicitam que seja superior a 8400 Kcal/kg considerando uma margem de erro de 10%.

#### **4.2.2.2 Parâmetro Umidade**

O quadro 8 demonstra os dados referente ao valor em milímetros (mm) percentuais do parâmetro de Umidade dos combustíveis primários (coque alto e baixo enxofre e carvão) nas 14 fábricas dispostas em diferentes localizações no país classificadas em suas regionais.

**Quadro 8 – Parâmetros técnicos dos combustíveis primários – Umidade (mm %)**

<b>Fábrica</b>	<b>Regional</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>
<b>1</b>	<b>SU</b>	8	9	6
<b>2</b>		8	9	6
<b>3</b>	<b>SE</b>	8	11	10
<b>4</b>		ND	ND	8
<b>5</b>		8	12	12
<b>6</b>	<b>NE</b>	ND	ND	4
<b>7</b>		ND	ND	4
<b>8</b>		ND	ND	4
<b>9</b>	<b>CN</b>	9	8	4
<b>10</b>		ND	ND	ND
<b>11</b>		ND	ND	ND
<b>12</b>		8	9	9
<b>13</b>		ND	ND	10
<b>14</b>		ND	ND	13

Fonte: Autoria Própria (2021)

Os dados de umidade se enquadram nos valores requeridos pela empresa demonstrados no quadro 5 (valores parâmetros da faixa limite para umidade) que solicitam uma faixa de 7 a 12% considerando uma margem de erro de até 10%.

#### **4.2.2.3 Parâmetro Cinzas**

O quadro 9 demonstra os dados referente ao valor em quilogramas (kg) percentuais do parâmetro de Cinzas dos combustíveis primários (coque alto e baixo enxofre e carvão) nas 14 fábricas dispostas em diferentes localizações no país classificadas em suas regionais.

**Quadro 9 – Parâmetros técnicos dos combustíveis primários – Cinzas (kg %)**

<b>Fábrica</b>	<b>Regional</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>
<b>1</b>	<b>SU</b>	0,49	0,36	0,27
<b>2</b>		0,49	0,36	0,27
<b>3</b>	<b>SE</b>	0,01	0,08	0,15
<b>4</b>		ND	ND	0,25
<b>5</b>		0,01	0	0
<b>6</b>	<b>NE</b>	ND	ND	0,08
<b>7</b>		ND	ND	0,08
<b>8</b>		ND	ND	0,08
<b>9</b>	<b>CN</b>	0,08	0,14	0,44
<b>10</b>		ND	ND	ND
<b>11</b>		ND	ND	ND
<b>12</b>		0,11	0,09	0,125
<b>13</b>		ND	ND	0,06
<b>14</b>		ND	ND	0

Fonte: Autoria Própria (2021)

Os dados de cinzas se enquadram nos valores requeridos pela empresa demonstrados no quadro 5 (valores parâmetros da faixa limite para cinzas) que solicitam valores até 0,50% considerando uma margem de erro de até 10%.

#### **4.2.3 Combustíveis Alternativos**

De mesma forma, com base em obtermos dados comparativos que podem ser analisados com um viés técnico e sustentável, os dados de combustíveis alternativos (resíduos coprocessados) serão abordados abaixo.

##### **4.2.3.1 Parâmetro Poder Calorífico**

O quadro 10 demonstra os dados referente ao valor em quilocaloria por quilograma (Kcal/kg) do parâmetro de Poder Calorífico dos combustíveis alternativos (resíduos coprocessados) nas 14 fábricas dispostas em diferentes localizações no país classificadas em suas regionais.

**Quadro 10 – Parâmetros técnicos dos combustíveis alternativos – Poder Calorífico (Kcal/kg)**

<b>Fábrica</b>	<b>Regional</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>
<b>1</b>	<b>SU</b>	3459	3667	3467	3687
<b>2</b>		3918	4039	3841	4052
<b>3</b>	<b>SE</b>	4081	4153	4263	4268
<b>4</b>		4770	4452	4726	4804
<b>5</b>		6294	6293	6310	6341
<b>6</b>	<b>NE</b>	4464	4122	3887	4722
<b>7</b>		4908	4837	4645	4872
<b>8</b>		3924	3810	3884	4186
<b>9</b>	<b>CN</b>	3844	4137	3500	3782
<b>10</b>		4878	5152	5381	4904
<b>11</b>		4575	4103	4619	4634
<b>12</b>		4023	4214	3681	3911
<b>13</b>		4627	4326	3565	4125
<b>14</b>		4259	4461	4843	4545

Fonte: Autoria Própria (2021)

Os dados de poder calorífico se enquadram nos valores requeridos pela empresa demonstrados no quadro 6 (valores parâmetros padrões esperados para combustíveis alternativos) que solicitam que seja entre 3250 a 4330 Kcal/kg dependendo da regional considerando uma margem de erro de 10%.

#### **4.2.3.2 Parâmetro Umidade**

O quadro 11 demonstra os dados referente ao valor em milímetros (mm) percentuais do parâmetro de Umidade dos alternativos (resíduos coprocessados) nas 14 fábricas dispostas em diferentes localizações no país classificadas em suas regionais.

Quadro 11 – Parâmetros técnicos dos combustíveis alternativos – Umidade (mm %)

Fábrica	Regional	AGO	SET	OUT	NOV
1	SU	28	30	29	28
2		18	19	20	19
3	SE	24	22	22	21
4		17	20	23	26
5		6	6	12	14
6	NE	19	17	16	18
7		7	14	14	8
8		40	35	35	33
9	CN	24	25	15	27
10		26	21	22	24
11		9	12	14	22
12		15	15	16	16
13		34	28	25	16
14		7	14	19	21

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Os dados de umidade se enquadram nos valores requeridos pela empresa demonstrados no quadro 6 (valores parâmetros padrões esperados para combustíveis alternativos) que solicitam que seja entre 24 a 28 milímetros percentuais (mm %) dependendo da regional considerando uma margem de erro de 10%.

#### 4.2.3.3 Parâmetro Cinzas

O quadro 12 demonstra os dados referente ao valor em quilogramas (kg) percentuais do parâmetro de Cinzas dos combustíveis alternativos (resíduos coprocessados) nas 14 fábricas dispostas em diferentes localizações no país classificadas em suas regionais.

Quadro 12 – Parâmetros técnicos dos combustíveis alternativos – Cinzas (kg %)

Fábrica	Regional	AGO	SET	OUT	NOV
1	SU	32	31	31	29
2		30	29	29	29
3	SE	15	19	21	20
4		18	24	20	19
5		15	13	12	13
6	NE	19	20	25	23
7		12	14	14	12
8		25	26	27	25
9	CN	23	19	34	11
10		20	14	14	20
11		25	24	23	25
12		17	22	32	24
13		ND	ND	ND	ND
14		30	28	22	23

Fonte: Autoria Própria (2021)

Os dados de cinzas se enquadram nos valores requeridos pela empresa demonstrados no quadro 6 (valores parâmetros padrões esperados para combustíveis alternativos) que solicitam que seja entre 25 a 29 quilogramas percentuais (kg %) dependendo da regional considerando uma margem de erro de 10%.

#### 4.2.3.4 Parâmetro Cloro

No quadro 13 demonstra os dados referente aos valores do Cloro em quilogramas (kg) percentuais dos combustíveis alternativos (resíduos coprocessados) nas 14 fábricas dispostas em diferentes localizações no país classificadas em suas regionais. Este, não é presente para os combustíveis fósseis (coque alto enxofre, baixo enxofre e carvão), pois não apresentam critérios de análises técnicos por não apresentarem essa composição química em quantidade relevante para estudo.

**Quadro 13 – Parâmetros técnicos dos combustíveis – Cloro (kg %)**

Fábrica	Regional	AGO	SET	OUT	NOV
1	SU	0,4	0,37	0,49	0,49
2		0,46	0,63	0,43	0,47
3	SE	0,46	0,43	0,44	0,37
4		0,26	0,28	0,27	0,25
5		ND	ND	ND	ND
6	NE	0,23	0,26	0,28	0,28
7		0,29	0,29	0,31	0,27
8		ND	ND	ND	ND
9	CN	0,3	0,32	0,15	0,25
10		ND	ND	ND	ND
11		ND	ND	0,21	0,24
12		0,27	0,29	0,21	0,29
13		ND	ND	ND	ND
14		ND	ND	ND	ND

Fonte: Autoria Própria (2021)

Os dados de cloro se enquadram nos valores requeridos pela empresa demonstrados no quadro 6 (valores parâmetros padrões esperados para combustíveis alternativos) que solicitam que seja entre 0,4 a 2,7 quilogramas percentuais (kg %) dependendo da regional considerando uma margem de erro de 10%.

Outros parâmetros técnicos não apresentam características que impactam diretamente na produção de clínquer, não afetando na produção e nem na qualidade do produto final (clínquer). Por este motivo, não foram abordados com dados teóricos.

#### 4.2.4 Análise dos parâmetros dos combustíveis

Analisando os combustíveis (coques e carvão) em comparação com os combustíveis alternativos (resíduos coprocessados), é possível identificar que ambos possuem altos níveis de poder calorífico, porém os níveis dos combustíveis alternativos não alcançam o alto valor energético dos combustíveis.

Dessa forma, é possível analisar na empresa de estudo que o poder calorífico do combustível primário é superior aos combustíveis alternativos. Por isso, a presença na composição do mix (mistura) de combustíveis primários em relação aos



combustíveis alternativos ainda, mesmo que em pequenas quantidades, é existente no processo das fábricas na empresa de estudo.

De maneira semelhante, analisando outros parâmetros o teor de cinza deve ser mínimo, caso contrário, pode influenciar na química do clínquer. As cinzas geradas fornecem muitos dos constituintes presentes nas matérias-primas, e torna-se necessário compatibilizá-las com estas, a fim de que sejam absorvidas em alta temperatura na matriz do clínquer (CARPIO et al. 2003 apud Carvalho, 1995). Apesar de influenciarem tecnicamente, os dados demonstram que a porcentagem de cinzas é superior em materiais alternativos. Assim, o material alternativo que tem o intuito de reduzir resíduos teria como material resultante a cinza, porém, este material pode ser reaproveitados como aditivos na produção de cimento nas fábricas. A cinza não afeta os critérios de qualidade do clínquer no seu processo final.

A análise comparativa para o parâmetro técnico de umidade, demonstra que os combustíveis alternativos possuem maior índice percentual de umidade em sua composição. Porém, este dado não afeta nos critérios de qualidade do clínquer em seu processo final, apenas impacta no maior tempo gasto para alcançar alta temperatura, devido a maior porcentagem de água na constituição.

Para a análise do parâmetro técnico Cloro, apenas há dados significativos para os combustíveis alternativos, por sua vez, a composição do Cloro tem valores baixos, não impactando na produção de clínquer em alto fornos, não afetando corrosão pela sua quantidade ser muito reduzida.

De forma geral, a verificação dos dados coletados dos parâmetros situam-se dentro dos limites considerados esperados, quando comparados os valores da faixa limite solicitada pela empresa ou próximos dos valores padrões esperados (ambos considerando uma faixa de segurança, ou assim dizendo, uma margem de erro de 10 %). Analisando estes dados, assente que os combustíveis atendem o limite solicitado na empresa, podendo assim serem utilizados nos processos.

Assim como, quando avaliadas pelas classificações regionais, os materiais comportam-se com valores médios diferentes. Logo, em todos os parâmetros assim analisados, consideram-se dentro do limite solicitado na empresa para a permissão da utilização do combustível nos processos em alto fornos.

O poder calorífico será abordado com maior ênfase no próximo tópico, considerando que este parâmetro é o fator de maior importância para geração energética, conseqüentemente, sendo importante para a qualidade do clínquer em seu processo final de produção.

### **4.3 Análise do Poder Calorífico na mistura dos combustíveis**

Segundo Francesquett *et al.* (2011), o Poder Calorífico é um dos parâmetros mais importantes para geração de quantidade de energia ou calor que liberam durante sua combustão, com isso, é um parâmetro importante para a qualidade dos combustíveis. Esta propriedade é conhecida como calor de combustão ou poder calorífico do combustível (RUSSEL, 1994; HILSDORF *et al.*, 2004; AL-GHOUTI, AL-DEGS & MUSTAFA, 2010).

Com base no parâmetro de Poder Calorífico apresentados para os combustíveis primários e combustíveis alternativos, apresentado no quadro 14, assim, há uma análise comparativa percentual referente a quantidade de quilograma (kg) percentual utilizado na relação de combustíveis sobre a quantidade percentual de produto final clínquer, ou assim dizendo, a porcentagem de combustíveis primários na composição total de combustíveis na produção de clínquer em cada fábrica de estudo assim enumeradas e classificadas por regionais.

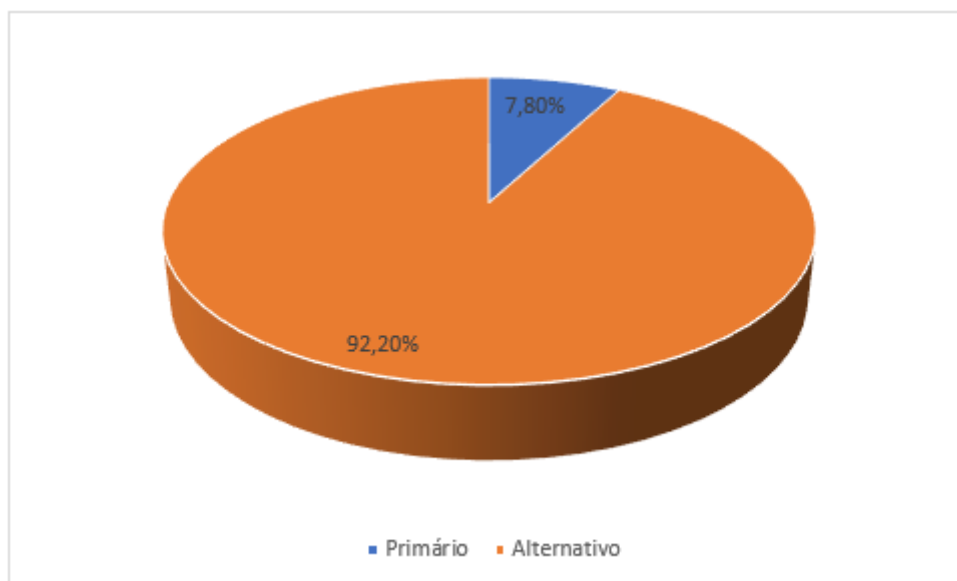
**Quadro 14 – Análise da relação percentual dos combustíveis primários**

Fábrica	Regional	AGO	SET	OUT	NOV	Média
1	SU	8,40%	8,70%	8,70%	8,30%	8,40%
2		7,10%	6,30%	6,30%	6,20%	6,30%
3	SE	8,50%	8,10%	7,40%	7,50%	7,70%
4		6,80%	7,60%	7,20%	7,00%	7,60%
5		9,80%	10,00%	9,60%	9,40%	10,20%
6	NE	9,80%	9,50%	9,10%	8,70%	10,30%
7		10,50%	10,60%	10,40%	10,40%	10,90%
8		8,50%	11,70%	8,10%	8,10%	7,70%
9	CN	9,40%	9,50%	7,10%	8,30%	6,50%
10		7,90%	7,90%	7,60%	7,40%	7,40%
11		8,10%	8,40%	8,50%	7,40%	8,60%
12		7,50%	7,90%	5,60%	6,50%	5,70%
14		1,90%	0,00%	1,10%	5,30%	4,70%
TOTAL	BR	9%	9%	8%	8%	9%

Fonte: Autoria Própria (2021)

Dessa forma, é possível identificar o percentual do poder calorífico utilizado nas misturas utilizadas na empresa, podendo assim identificar que a quantidade de combustíveis primários utilizados é muito inferior aos combustíveis alternativos (restante da porcentagem até completar 100% da quantidade total), como exemplo, para um mix de combustíveis classificado como BR, são utilizados 9% de combustíveis primários e 91% de combustíveis alternativos. Sendo possível identificar qual a relação entre o poder calorífico de cada combustível (primário e alternativo), a partir da média dos dados dos parâmetros calculados nas tabelas anteriores.

Este resultado pode ser identificado no gráfico 9, representando os valores médios das fábricas 1 a 14. O gráfico demonstra os dados percentuais do mix dos combustíveis primários e dos combustíveis alternativos.

**Gráfico 9 – Percentagens de combustíveis no mix para uma média Brasil**

**Fonte: Autoria Própria (2021)**

Com base nos dados percentuais dos combustíveis primários, retira-se a média utilizada nos períodos de agosto a novembro dos dados percentuais (quantidade percentual do quadro 14) e multiplica com os valores do poder calorífico em quilograma retirados dos quadros 7 (para os combustíveis primários) e 10 (para os combustíveis alternativos).

Obtendo assim um valor de poder calorífico dosado para o mix (misturas) dos combustíveis já preparadas, afim de identificar a média da quantidade de poder calorífico em quilograma percentual da mistura de combustíveis alternativos e primários individualmente, como é possível identificar nos quadros 15 e 16.

O quadro 15 apresenta os dados percentuais do poder calorífico em quilocalorias por quilogramas (Kcal/kg) percentuais dos combustíveis primários do mix (mistura) de combustíveis para produção de clínquer em cada fábrica assim enumerada.

**Quadro 15 – Percentual do poder calorífico dos combustíveis primários na composição do mix de combustíveis alternativos e primários para a produção de clínquer**

<b>Fábrica</b>	<b>Média Poder Calorífico (Kcal/kg)</b>	<b>Média percentual da quantidade de combustível ( kg %)</b>	<b>Poder Calorífico ((Kcal/kg) %)</b>
<b>1</b>	7773	8,4	65296
<b>2</b>	7773	6,3	48972
<b>3</b>	8722	7,7	67162
<b>4</b>	8393	7,6	63787
<b>5</b>	8712	10,2	88859
<b>6</b>	8752	10,3	90146
<b>7</b>	8752	10,9	95397
<b>8</b>	8752	7,7	67390
<b>9</b>	8648	6,5	56214
<b>10</b>	ND	7,4	-
<b>11</b>	ND	8,6	-
<b>12</b>	8640	5,7	49248
<b>13</b>	8841	6,9	61003
<b>14</b>	8693	4,7	40857

**Fonte: Autoria Própria (2021)**

O quadro 16 apresenta os dados percentuais do poder calorífico em quilocalorias por quilogramas (Kcal/kg) percentuais dos combustíveis alternativos do mix (mistura) de combustíveis para produção de clínquer em cada fábrica assim enumerada.

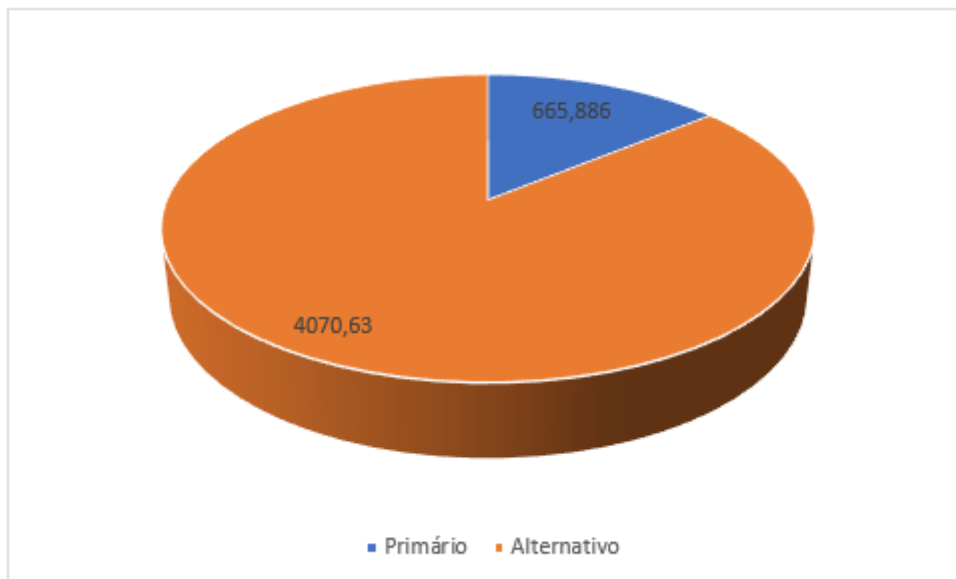
**Quadro 16 – Percentual do poder calorífico dos combustíveis primárias na composição do mix de combustíveis alternativos e primários para a produção de clínquer**

<b>Fábrica</b>	<b>Média Poder Calorífico (Kcal/kg)</b>	<b>Média percentual da quantidade de combustível ( kg %)</b>	<b>Poder Calorífico ((Kcal/kg) %)</b>
<b>1</b>	3570	91,6	327012
<b>2</b>	3963	93,7	371286
<b>3</b>	4191	92,3	386852
<b>4</b>	4688	92,4	433171
<b>5</b>	6310	89,8	566593
<b>6</b>	4299	89,7	385598
<b>7</b>	4816	89,1	429061
<b>8</b>	3951	92,3	364677
<b>9</b>	3816	93,5	356773
<b>10</b>	5079	92,6	470292
<b>11</b>	4483	91,4	409723
<b>12</b>	3957	94,3	373169
<b>13</b>	4161	93,1	387366
<b>14</b>	4527	95,3	431423

**Fonte: Autoria Própria (2021)**

As análises dos percentuais do poder calorífico demonstram que a média do poder calorífico dos combustíveis, quando analisados individualmente, para os combustíveis primários é superior ao valor energético (poder calorífico) dos combustíveis alternativos, contudo, na consideração percentual quando misturados os combustíveis primários e alternativos encontram-se níveis superiores de poder calorífico nos combustíveis alternativos, isso deve-se ao alto percentual de combustível alternativo que é utilizado no mix (mistura) de combustível.

A análise percentual do poder calorífico pode ser identificado no gráfico 10, demonstrando os combustíveis primários e alternativos.

**Gráfico 10 – Valores percentuais para o poder calorífico em uma média Brasil**

**Fonte: Autoria Própria (2021)**

Os dados percentuais do mix (mistura) de combustíveis deve-se a dois fatos que são relevante para a análise de estudo deste trabalho, que são o custo dos combustíveis alternativos serem menores que os custos dos combustíveis primários e a dosagem dos dois combustíveis gerarem valor energético suficiente para alcançar os níveis energéticos de combustão conforme requeridos no processo de clínquerização.

Assim como, outro fator muito abordado atualmente, é a escolha da utilização de maior porcentagem de combustíveis alternativos no mix de combustíveis em razão ao benefício sustentável que a empresa tem como vantagem ambiental e social. Este tema será abordado no próximo tópico com maior ênfase.

#### **4.4 Análise sustentável**

As vantagens que os materiais coprocessados trazem na substituição dos combustíveis são muito viáveis para a fábrica por serem materiais mais baratos e com uma boa capacidade de aproveitamento energético e alcance de altas temperaturas. Pelo processo de reaproveitamento consistir na eliminação dos resíduos diminuindo o

volume em aterros e por diminuir a utilização de materiais não renováveis a empresa se destaca em quesitos favoráveis de preservação da natureza e ambientais.

O uso dos materiais coprocessados (combustíveis alternativos) na substituição dos combustíveis primários trazem vantagens para a empresa e para o benefício da sociedade. Isto se deve ao fato de que os combustíveis alternativos reduzem os níveis de emissão de gases poluentes, diminuem a quantidade de resíduos (industriais, agrícolas, lodos, materiais contaminados, entre outros) que estariam dispostos em aterros, assim como reduzem o consumo de materiais não renováveis (combustível primário), permitindo assim a conservação desses materiais.

A forte presença da agricultura no Brasil é um grande influente na escolha dos materiais coprocessados, utilizados como geradores térmicos e matérias-primas para a produção de clínquer nos fornos. A abundância dos resíduos da agricultura torna o processo sustentável pela utilização de materiais que seriam desperdiçados e trazem uma finalidade para o produto.

Os benefícios que os combustíveis alternativos possuem beneficiam não somente a empresa, mas também a sociedade e o meio ambiente. O cuidado com o meio ambiente afeta nossa sociedade não só em uma perspectiva atual como também em uma perspectiva futura. Assim, a proteção da atmosfera, dos solos, dos materiais não renováveis e também com a redução de lixo são ações que também resultam em efeitos para gerações futuras.

As vantagens da utilização do coprocessamento são poder ter melhor aproveitamento do material por sua alta capacidade de alcançar e permanecer em alta temperatura da chama, pelo seu alto poder calorífico (apesar de não alcançar os níveis de poder calorífico dos combustíveis primários), alcançando aproximadamente 2000°, a neutralização de ácidos por suas características alcalinas das matérias primas, incorporação das cinzas ao clínquer e sua estabilidade térmica.

Segundo o CONAMA (1999), o coprocessamento deve substituir os combustíveis de maneira parcial. Logo, o processo ainda conta com os dois tipos de materiais assim como acontece na fábrica de estudo.

Desta maneira, a seleção dos critérios de porcentagem entre combustíveis e materiais coprocessados tem uma grande vantagem econômica visto que os materiais



coprocessados, apesar de não terem altos níveis de poder calorífico, eles são ótimos materiais na função de gerarem energia. Logo, por serem materiais mais econômicos, eles garantem a combustão e auxiliam os combustíveis a garantirem a geração de energia térmica no processo de clínquerização.

#### **4.5 Considerações finais**

As principais condições aqui estudadas e levantadas foram os parâmetros dos combustíveis, analisando com maior ênfase seu valor energético que pode ser avaliada e discutida com dados técnicos do poder calorífico constituinte do material. Esta análise é diretamente relacionada com a qualidade do produto final no processo de clínquerização nos fornos das fábricas cimenteiras.

O mix de combustíveis é a mistura de duas composições que também são mix ou também chamados de misturas de dois tipos de materiais: mix (mistura) combustíveis alternativos e mix (mistura) de combustíveis primários (coque alto enxofre, baixo enxofre e carvão).

As análises dos parâmetros realizadas neste estudo verificaram que seus valores atendem aos valores solicitados na empresa e se justificam com embasamento teórico. Assim como, se enquadram com os valores a partir das classificações regionais de cada parâmetro.

A análise realizada com a utilização dos materiais coprocessados, teve vantagem de dois temas importantes e muito discutidos atualmente. O benefício energético no processo que relaciona diretamente com a qualidade da produção e o benefício sustentável, e de redução de custo, da alta quantidade de volume de combustíveis alternativos em relação aos combustíveis primários na mistura de combustíveis para a produção de clínquer.

## 5 CONCLUSÃO

O estudo realizado neste trabalho, apresentou uma análise dos parâmetros dos combustíveis primários (coque alto e baixo enxofre e carvão) e os combustíveis alternativos (resíduos coprocessados). Em que, as propriedades técnicas dos materiais foram relacionadas com a qualidade do produto final do processo de clínquerização da fábrica em estudo.

Os dados estudados são avaliadas a partir de um valor (ou faixa) padrão da empresa que foram estabelecidos por um comitê técnico. Os dados devem estar dentro ou próximas desta faixa requerida, considerando uma margem de erro de 10%. Logo, os combustíveis atendem aos valores esperados.

Os parâmetros poder calorífico, umidade, cinzas e cloro, foram analisadas individualmente e seus valores atendem aos valores para gerar uma boa qualidade para a produção de clínquer. Considerando a análise por região, também se enquadram os valores para determinadas regiões, entendendo que, cada localização tem suas características próprias e isso justifica os diferentes tipos de materiais utilizados.

A análise realizada considerando o percentual do mix de combustíveis, combinação feita entre os combustíveis alternativos e os primários, identificou que os níveis de poder calorífico foram superiores percentualmente nos combustíveis alternativos, diferentemente da análise individual. Isso deve-se ao fato da grande utilização percentual (aproximadamente 90%) de combustíveis alternativos.

Esta distribuição de combustíveis é em razão a dois critérios: benefícios sustentável e social e redução de custo no processo final, pelo fato de que, os materiais alternativos serem mais sustentáveis, garantindo redução de resíduos em aterros e trazendo maior benefício ambiental. Assim como, embasados em fatos teóricos, o custo da utilização de materiais coprocessados serem menores em relação ao custo dos combustíveis primários (coque alto e baixo enxofre e carvão).

Por fim, na composição de mix de combustíveis utilizados nos processos de combustão na empresa, apresenta um alto rendimento com alcances energéticos conforme o requerido, assim como, traz vantagens sustentáveis ambientais e sociais

no processo para a empresa. Além disso, a utilização de maior porcentagem de combustíveis alternativos traz vantagens econômicas para a empresa.

## **6 RECOMENDAÇÕES DE FUTURAS PESQUISAS**

Como sugestões de próximos estudos, pode-se abranger as análises das relações das propriedades técnicas com a eficiência energética de estudo. Assim, pode-se desenvolver associações entre a volatilidade e o poder calorífico de cada material.

Outra sugestão que se pode analisar é analisar fornos com diferentes especificações. Assim, será possível entender as necessidades e requisitos de cada tipo de forno e assim fazer uma associação com as propriedades dos materiais.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10006**: Gestão da qualidade - Diretrizes para a qualidade no gerenciamento de. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

AL-GHOUTI, M.; AL-DEGS, Y.; MUSTAFA, F. **Determination of hydrogen content, gross heat of combustion, and net heat of combustion of diesel fuel using FTIR spectroscopy and multivariate calibration**. Fuel, n. 89, p.193-201, 2010.

ARAÚJO, Rafaela Albuquerque Valença de. In: ENCONTRO DE ENSINO E PESQUISA EM ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE, 4., 2013, Brasília, Df. **Abordagem Qualitativa Na Pesquisa Em Administração**: Um Olhar Segundo a Pragmática da Linguagem. Brasília, Df, 2013. p. 1-12.

BASILIO, F. A. – **Cimento Portland**. Estudo Técnico. 5ª ed. São Paulo, ABCP, 1983.

BAUER, L.A. Falcão. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais** ed. G. C. Isaia. 3ªed. São Paulo, IBRACON, 2017. Volume1.

BAUER, L.A. Falcão. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais** ed. G. C. Isaia. 3ªed. São Paulo, IBRACON, 2017. Volume2.

CARVALHO, J. M. F. de et al. **More eco-efficient concrete**: an approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. Construction and Building Materials, v. 206, p. 397-409, maio 2019.

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819303496>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

CARPIO, Ricardo Carrasco; SILVA, Rogério José da; JORGE, Ariosto Bretanha. **OTIMIZAÇÃO DA MISTURA DE COMBUSTÍVEIS SECUNDÁRIOS ALTERNATIVOS VISANDO ATENDER AS RESTRIÇÕES OPERACIONAIS E AMBIENTAIS EM FORNOS DE CIMENTEIRAS**. 2003. 12 f. Tese (Doutorado) - XXXV SBPO, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

CHIERICATTO, M.D.S *et. al.* **Vantagens Do Uso De Combustíveis Alternativos No Processo Produtivo De Uma Indústria Cimenteira**. 2017. 15 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Fupac CI, Joinville, SC, 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Nº 264 DE 1999**: Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos. -: -, 1999. 11 p.

CORRÊA, Lásaro Roberto. Sustentabilidade na construção civil. UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2009.

CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa**: Método qualitativo, quantitativo e misto. 2. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2007.

DANTOS, Leandro Bruno; ANDRADE, Tibério. **A Indústria De Cimento No Brasil: ORIGENS, CONSOLIDAÇÃO E INTERNACIONALIZAÇÃO**. 2011. 18 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Unesp, Presidente Prudente, SP, 2011.

DUDA, W. H. **Cement data-book**. International Process Engineering in the Cement Industry. v. 1, Berlin: Bauverlag GmbH, 1985.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA**: Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha. 203 ed. Colombo, Pr: Embrapa, 2012. 5 p.

FERRARI; R.. **Coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clínquer**. Rio Bonito, Rj: Itambé, 2002.

FRANCESQUETT *et al.* **Quantificação do poder calorífico da gasolina utilizando infravermelho próximo e análise multivariada**. In: XXXI Encontro Nacional De Engenharia De Producao, 31, 2011, Belo Horizonte, Mg. Artigo. Belo Horizonte, Mg: Enegep, 2011. p. 1-12.

Gandra, Beatriz Fausta; Reis, Henriquison Magela Bottrel; Fernandes, Mauro Vivaldino. **ANÁLISE DO EFEITO DE DIFERENTES COMBUSTÍVEIS NA CONDIÇÃO DE SMALL EM ALTOS-FORNOS**, p. 56-66. In: *45º Ironmaking / 16º Iron Ore / 3º Agglomeration*, Rio de Janeiro, 2015.

ISSN: 2594-357X, DOI 10.5151/4444-4444-26173

GARCIA, R. L et al. – **Coleta seletiva e Reciclagem de excedentes industriais**. FIESP. São Paulo, SP, 90 p. 2003

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GOLDEMBERG, J.; **Science** 2007, 315, 808

GOLDEMBERG, J.; **Biomassa e energia**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

GURGEL, Aline do Monte. **Uso Do Coque Verde De Petróleo Como Matriz Energética Em Pernambuco E A Perspectiva Da Vigilância Em Saúde: ESTUDO DE CASO NO COMPLEXO INDUSTRIAL PORTUÁRIO DE SUAPE**. 2011. 159 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Fundação Oswaldo Cruz, Recife, 2011.

HILSDORF, J. W.; BARROS, N. D.; TASSINARI, C. A.; COSTA, I. **Química tecnológica**. Editora Thomson. São Paulo, 2004.

\_\_\_\_\_. **Informações referentes à viagem a Moscou**. Comunicação pessoal. nov. 2010. CENTURIONE, S. L. **Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland**. São Paulo: USP, 1993. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

KIHARA, Y. et al. **A Microscopia do clínquer Portland e seus benefícios tecnológicos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 2, 1990, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1990

KIHARA, Y; CENTURIONE, S. L. **O Cimento Portland**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 296-322.

- LADEIRA, Pedro Lucas Gervásio. **Redução das emissões de nox na clinquerização pela utilização das técnicas de queima e combustão estagiada**. 2019. 189 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2019.
- LAKATOS, Eva Maria e MARCONI, Marina de Andrade. **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1996.
- Lima, A. B. de. **O Processo Produtivo do Cimento Portland**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2011.
- LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. 4rd ed. London: Arnold, 1998.
- LOISON, Roger; FOCH, Pierre; BOYER, André. **Coke: Quality and Production**. Londres, Inglaterra: Cerchar, 1989. 555 p.
- MANTUS, E.F. – **All Fired-up: Burning Harzardous Waste in Cement Kilns**. Seattle, U.S.A.: Envirmental Toxicology International Inc., The combustion Research Institute, 1992.
- MARION, J.C.. **Contabilidade Empresarial**. São Paulo: Atlas, 2010.
- MARQUES, M. (1999). **Coprocessamento em fornos de cimento**. Revista Gerenciamento Ambiental, n. 6.
- MARSON, Michel Deliberali. **A evolução da indústria de máquinas e equipamentos no Brasil: Dedini e Romi, entre 1920 e 1960**. Nova Economia: [s. n.], 2014.
- MARTIGNAGO, Graciella. **O papel do conhecimento no processo de internacionalização de uma multinacional brasileira**. 2014. 379 f. Tese (Doutorado) - Curso de Administração, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.
- MOCHIZUKI, Victória de Lima. **Balanco térmico do forno rotativo e do resfriador da fábrica elizabeth cimentos ltda**. 2017. 55 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2017.



MOREIRA, Daniel A. **Medida da produtividade na empresa moderna**. São Paulo: Livraria Pioneira Editora, 1991.

NEVES, Rafael Martins das. **Aplicação do método de análise e solução de problema**: estudo da variabilidade das resistências à compressão no cimento do tipo portland. 2016. 1 v. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2016.

NEVILLE, A.M., **Properties of Concrete**, 4th Ed., Pearson Education Limited, England, 2002.

OFICEMEN – ***Agrupación de fabricantes de cemento de España. Combustibles alternativos en la fabricación del cemento: valorización energética de residuos mediante su empleo como combustibles alternativos em hornos de hornos de cemento.*** Madrid, out. 1998. 21p.

ORTH, Maria Helena de Andrade. **Curso de Administração de Resíduos Sólidos**. Ecolatina, 2002. 5ª Conferencia Latina América Sobre o Meio Ambiente. Belo Horizonte.

PANTALEÃO, Natália Cristina Alves. **Máquinas e sociedade**: uma abordagem ética acerca do artificial. Unesp, Marília, São Paulo, 2010.

PORTLAND clinker production with carbonatite waste and tire-derived fuel: crystallochemistry of minor and trace elements. **Cerâmica (60)**, [S. l.], p. 552-562, 26 jan. 2015. Disponível em: <https://www.readcube.com/articles/10.1590/S0366-69132014000400014?tab=summary>. Acesso em: 28 jul. 2021.

RAMOS, Luth Silva. **Estudo para o desenvolvimento de um injetor jato-Y para a mistura de combustíveis de aviação e biocombustíveis**. Unesp, Guarantiguetá, São Paulo, 2017.

RICHARDSON, et al. **Pesquisa social**: métodos e técnicas. 3. ed. rev. ampl. São Paulo: Atlas, 2007.

RIBEIRO, Carlos Luiz Ramos. **Co-processamento de resíduos industriais em fornos de clínquer**. 2000, 57p. Monografia (graduação em Ciências Ambientais). Universidade de Franca, Franca, 2000.

RUSSELL, J. B. **Química geral**. 2. Ed. São Paulo: Makron, 628p, 1994.

SALOMON, V.G., **Otimização da Mistura de Resíduos Industriais para a Produção de um Combustível Derivado de Resíduos Destinado ao Coprocessamento em Fornos Rotativos**, SOBRAPO, 2001.

SILVA, Guilherme Liziero Ruggio da; DESTRO, Elton; MARINHO, Geraldo Magela; ASSIS, Paulo Santos. Caracterização química, física e metalúrgica das frações granulométricas da mistura de carvão da gerdau açominas. In: contribuição técnica ao 1º seminário de carvão, 1., 2011, gramado. **Caracterização química, física e metalúrgica das frações granulométricas da mistura de carvão da gerdau açominas**. Gramado, 2011. p. 1-13.

SNIC. **Resultados Preliminares de Julho**. 2021. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=63-icia=Resultados%20Preliminares%20de%20Julho%202021>. Acesso em: 15 ago. 2021.

SATO, Paulo Eduardo Solak. **Distribuição de elementos químicos menores no processo de fabricação do Cimento Portland**. 2004. 137 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mineralogia e Petrologia, Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SUZIGAN, W. **A indústria Brasileira: origens e desenvolvimento**. São Paulo: Brasiliense, 1986.

TILLMAN, David A.; DUONG, Dao N. B.; HARDING, N. Stanley. **Solid Fuel Blending**.; Butterworth-Heinemann, 2012.

VERDERA. **Apresentamos Verdera**- a nova marca de coprocessamento. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/noticia/apresentamos-verdera-a-nova-marca-de-coprocessamento/>. Acesso em: 16 ago. 2021.

VERDERA. **Verdera Solution**. Disponível em: <https://www.verderasolutions.com.br/>. Acesso em: 16 ago. 2021.

VIANA, Lucas Machado. **Estudo da viabilidade técnica do uso de biogás em uma usina siderúrgica usando simulação computacional**. 2015. 43 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

VIEW on ScienceDirect. **Waste Materials Used in Concrete Manufacturing**. [S. l.]: Satish Chandra, 1996. 672 p.

ZAMPIERI, V. A. **Mineralogia e Mecanismos de Ativação e Reação das Pozolanas de Argilas Calcinadas**. São Paulo: USP, 1989. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.