

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO BOTELHO FAGUNDES

AVALIAÇÃO DO BALANÇO TÉRMICO E ANÁLISE ECONÔMICA DA MATRIZ DE
COMBUSTÍVEIS EM FORNOS DE CLÍNQUER COM APROVEITAMENTO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS POR MEIO DA TECNOLOGIA DE COPROCESSAMENTO

CURITIBA

2022

LEONARDO BOTELHO FAGUNDES

AVALIAÇÃO DO BALANÇO TÉRMICO E ANÁLISE ECONÔMICA DA MATRIZ DE
COMBUSTÍVEIS EM FORNOS DE CLÍNQUER COM APROVEITAMENTO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS POR MEIO DA TECNOLOGIA DE COPROCESSAMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Ubirajara Gontarski

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a. Margarete Casagrande Lass Erbe

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Fagundes, Leonardo Botelho

Avaliação do balanço térmico e análise econômica da matriz de combustíveis em fornos de clínquer com aproveitamento de resíduos sólidos por meio da tecnologia de coprocessamento / Leonardo Botelho Fagundes. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientador: Carlos Alberto Ubirajara Gontarski

Coorientador: Margarete Casagrande Lass Erbe

1. Combustíveis – Comércio. 2. Balanço térmico. 3. Carvão mineral. 4. Coque de petróleo. 5. Resíduos sólidos - Reaproveitamento. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial. III. Gontarski, Carlos Alberto Ubirajara. IV. Erbe, Margarete Casagrande Lass. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MEIO AMBIENTE
URBANO E INDUSTRIAL - 40001016057P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LEONARDO BOTELHO FAGUNDES** intitulada: **AVALIAÇÃO DO BALANÇO TÉRMICO E ANÁLISE ECONÔMICA DA MATRIZ DE COMBUSTÍVEIS EM FORNOS DE CLÍNQUER COM APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS POR MEIO DA TECNOLOGIA DE COPROCESSAMENTO**, sob orientação do Prof. Dr. CARLOS ALBERTO UBIRAJARA GONTARSKI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 20 de Janeiro de 2023.

Assinatura Eletrônica

13/03/2023 21:03:33.0

CARLOS ALBERTO UBIRAJARA GONTARSKI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

03/04/2023 10:59:48.0

MARIANNE SUMIE KAWANO

Avaliador Externo (FACULDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

11/03/2023 08:16:34.0

ARION ZANDONÁ FILHO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

17/03/2023 17:27:26.0

MARGARETE CASAGRANDE LASS ERBE

Coorientador(a) (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Centro Politécnico - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3614 - E-mail: ppgmaui@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 263579

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 263579

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por tudo o que Ele tem me proporcionado em vida.

Aos meus pais Vicente e Miriam por sempre incentivarem a mim e aos meus irmãos, dando-nos todo suporte emocional necessário. Vocês são um presente de Deus na minha vida.

À minha esposa Judite, pelo apoio, incentivo, amor e cuidar nos meninos quando eu tinha que me dedicar a este trabalho.

Aos meus queridos e amados filhos, Leonardo e Daniel, são a verdadeira alegria e motivo que querer crescer mais e mais.

Aos meus irmãos, Izabela e Rafael, que são meus filhos mais novos. Quero sempre ser um bom exemplo para vocês.

À Supremo Secil por todo apoio e oportunidade que tem me concedido ao longo destes 10 anos como profissional do quadro da empresa. .

Ao meu time da Supremo Secil, que me auxiliaram na organização dos dados e na realização dos ensaios necessários.

À empresa TRIE ENGENHARIA, por meio dos profissionais Luis Germano e Joana Bretz, pela colaboração na realização em conjunto o balanço térmico da fábrica de Adrianópolis PR,

Aos queridos professores e orientadores Dr Carlos Alberto Gontarski e Dra Margarete Lass Erbe Casagrande que me prestaram todo suporte e compartilhamento de conhecimento.

À banca avaliadora, Dr Arion Zandona, Dra Marianne Kawano e MSc Mauricy Kawano que gentilmente cederam seu tempo para fazer parte da avaliação deste trabalho.

RESUMO

O aumento do preço do barril de petróleo teve como efeito a elevação dos custos dos combustíveis fósseis no Mundo e por consequência no Brasil. O coque de petróleo, principal combustível da indústria cimenteira brasileira, praticamente teve seu custo acrescido em mais de 170% nos últimos dois anos. A aquisição deste combustível é adquirido em sua grande maioria no exterior onde os preços variam em função do dólar e do ciclo econômico das commodities. Para combater os constantes aumentos de preço e por causa disso, elevação dos custos operacionais, a busca por alternativas como a tecnologia de coprocessamento de resíduos e a reutilização do carvão mineral são opções para mitigar a elevação dos custos. Apesar dos combustíveis alternativos e o carvão mineral terem maior variabilidade química, principalmente o primeiro, faz-se necessário maximizar a utilização destes combustíveis para reduzir o consumo do coque de petróleo. Para melhor entendimento desta avaliação econômico e energética, o processo de clínquerização será avaliado baseado em balanços de massa e energia, análise de dados operacionais com o forno de clínquer em operação estável. A maximização dos combustíveis alternativos, assim como a redução de combustíveis fósseis, serão alvo deste trabalho, visando manter premissas produtividade do forno, qualidade do clínquer, vida útil da mineração de calcário e emissões atmosféricas dentro da normativa estadual.

Palavras-chave: Matriz de combustíveis. Balanço térmico. Combustíveis alternativos. Carvão mineral. Coque de petróleo

ABSTRACT

The increase in the price of a barrel of Petroleum had the effect of cost elevation in the world and consequently in Brazil. Petroleum coke, the main fuel of the Brazilian cement industry, practically had its cost increased by more than 170% in the last two years. The acquisition of this relevant fuel is mostly purchased abroad, where the price varies depending on US dollar quotation and the economic cycle of the commodities. To combat the constant price increases and it is resulting high operational costs, the search for alternatives fuels such as waste co-processing technology and the reuse of mineral coal are options to mitigate the cost rise. Although alternative fuels and coal have greater chemical variability, especially the first cited, it is necessary to maximize the use of these fuels to reduce the consumption of petroleum coke. For a better understanding of this economic and energy evaluation, the clinkerization process will be evaluated based on mass and energy balances, operational data analysis with stable kiln operation. The maximization of alternative fuels, as well as the reduction of fossil fuels, will be the target of this work aiming to maintain assumptions such as kiln productivity, clinker quality, limestone mining life and atmospheric emissions within the state regulation.

Keywords: Fuel matrix. Heat balance. Alternative fuels. Coal. Petroleum coke.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PRODUÇÃO DE CIMENTO NO MUNDO (MILHÕES DE TON) DE 2013	18
FIGURA 2 – PRODUÇÃO DE CIMENTO NO BRASIL (MILHÕES DE TON) DE 1994 A 2019. PERÍODO PLANO REAL.....	19
FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DE CIMENTO	20
FIGURA 4 – CARREGAMENTO DE CALCÁRIO POR ESCAVADEIRA EM CAMINHÕES FORA DE ESTRADA.....	21
FIGURA 5 – BRITADOR DE MARTELOS.....	22
FIGURA 6 – RETOMADA DE PILHA DE CALCÁRIO MÉTODO CHEVRON.....	23
FIGURA 7 – MOINHO VERTICAL DE FARINHA	26
FIGURA 8 – MECANISMOS DE COMINUIÇÃO	27
FIGURA 9 – SILO CONTINUOUS FLOW (SILO CF).....	28
FIGURA 10 – MICROSCOPIA DO CLÍNQUER.....	30
FIGURA 11 – PROCESSO INTEGRADO DE PRÉ CALCINAÇÃO, CLINQUERIZAÇÃO E RESFRIAMENTO	32
FIGURA 12 – ETAPAS PROCESSO DE COMBUSTÃO DOS SÓLIDOS.....	33
FIGURA 13 – DOSADOR DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA TORRE DE PRÉ CALCINAÇÃO.....	34
FIGURA 14 – MOINHO VERTICAL DE CIMENTO	37
FIGURA 15 – MOINHO DE BOLAS DE CIMENTO.....	38
FIGURA 16 – CAMINHÃO CEBOLÃO	39
FIGURA 17 – ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS NO PROCESSO DE CLINQUERIZAÇÃO	42
FIGURA 18 – FORMAÇÃO DE SPRAY EM COMBUSTÃO DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS.....	43
FIGURA 19 – MAIORES CONSUMIDORES DE GN POR SETOR INDUSTRIAL	45
FIGURA 20 – HIERARQUIA DE SOLUÇÕES PARA RESÍDUOS	47
FIGURA 21 – EVOLUÇÃO NO CONSUMO DE RESÍDUOS COPROCESSADOS EM FORNOS DE CLÍNQUER (200 A 2017).....	49
FIGURA 22 – COMPARATIVO CONSUMO DE ENERGIA NA PRODUÇÃO DE CLÍNQUER.....	50
FIGURA 23 – APARELHO PARA MEDIÇÃO DE RUÍDOS (DECIBELÍMETRO).....	51

FIGURA 24 – FILTRO DE MANGAS.....	53
FIGURA 25 – VOLUME DE CONTROLE PARA BALANÇO DE MASSA.....	56
FIGURA 26 – VOLUME DE CONTROLE PARA BALANÇO DE ENERGIA.....	57
FIGURA 27 – VOLUME DE CONTROLE DE UM PROCESSO DE CLINQUERIZAÇÃO	58
FIGURA 28 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA APLICADA NO TRABALHO	59
FIGURA 29 – AMOSTRA DA MISTURA COQUE / CARVÃO MOÍDO.....	60
FIGURA 30 – AMOSTRAGEM DA MISTURA 3:1 ENTRE RT E PNEUS	61
FIGURA 31 – AMOSTRA DO MIX DE CA TRITURADO.....	62
FIGURA 32 – CALORÍMETRO IKA C5003/5001	65
FIGURA 33 – RESULTADO DE PCS NO GRÁFICO DA BOMBA CALORIMÉTRICA	66
FIGURA 34 – DETERMINAÇÃO DE CLORO VIA TITRINO 848 PLUS	68
FIGURA 35 – RESULTADO % VIA TITRINO 848 PLIS	69
FIGURA 36 – EQUIPAMENTO LECO PARA DETERMINAÇÃO DO % S	70
FIGURA 37 – PONTOS DE AMOSTRAGEM NA TORRE DE CICLONES	71
FIGURA 38 – CENTAURUS FLSMIDTH.....	72
FIGURA 39 – ESPECTRÔMETRO E DIFRATÔMETRO BRUKER	72
FIGURA 40 – CLÍNQUER NO CIRCUITO DE TRANSPORTE PARA O SILO.....	73
FIGURA 41 – ANÁLISES DE GASES DA CHAMINÉ DO FORNO	76
FIGURA 42 – TUBOS DE PITOT L E S	76
FIGURA 43 – VC1 - VOLUME CONTROLE COMPLETO.....	77
FIGURA 44 – VC2 – VOLUME DE CONTROLE BALANÇO DO RESFRIADOR	78
FIGURA 45 - COTAÇÃO BARRIL DE PETRÓLEO 2020 - 2022.....	91
FIGURA 46 – COMPARAÇÃO R\$/GJ.....	93

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – DESIGNAÇÃO NORMALIZADA, SIGLAS E CLASSES DO CIMENTO PORTLAND.....	36
QUADRO 2 – LIMITES DE COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND (% EM MASSA)	37
QUADRO 3 – CLASSIFICAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS CONFORME SUA ORIGEM	40

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE FARINHA	24
TABELA 2 – RESUMO DAS REAÇÕES DE DESCARBONATAÇÃO E CLINQUERIZAÇÃO	31
TABELA 3 – COMPARATIVO DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS ÓLEO 2A	42
TABELA 4 – COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS ENTRE COQUE DE PETRÓLEO E CARVÃO MINERAL	46
TABELA 5 – COMPARATIVO PODER CALORÍFICO INFERIOR DOS COMBUSTÍVEIS	47
TABELA 6 – COMPARATIVO ENTRE %H E UMIDADE TÍPICA DA MATRIZ DE COMBUSTÍVEIS	67
TABELA 7 – EXEMPLO RESUMO BALANÇO TÉRMICO	79
TABELA 8 – RESULTADOS DAS ANÁLISES DOS COMBUSTÍVEIS	81
TABELA 9 – RESULTADOS DAS ANÁLISES DA FARINHA ALIMENTADA	82
TABELA 10 – RESULTADOS DAS ANÁLISES XRF E XRD DO CLÍNQUER PRODUZIDO	83
TABELA 11 – DETERMINAÇÃO FATOR FARINHA CLÍNQUER (PRODUTIVIDADE DO FORNO)	85
TABELA 12 – RESULTADOS DO BALANÇO TÉRMICO	86
TABELA 13 – RESULTADOS DO BALANÇO TÉRMICO DO RESFRIADOR	88
TABELA 14 – DADOS OPERACIONAIS DO FORNO	89
TABELA 15 – DADOS QUALIDADE DOS COMBUSTÍVEIS	90
TABELA 16 – DADOS QUALIDADE DO CLÍNQUER	92

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABCP	- Associação Brasileira Cimento Portland
ABNT	- Associação brasileira de normas técnicas
BEN	- Balanço Energético Nacional
C2S	- Silicato Dicálcico (belita)
C3A	- Aluminato Tricálcico
C3S	- Silicato Tricálcico (alita)
C4AF	- Ferro aluminato tetra cálcico
CA	- Combustível Alternativo
CDR	- Combustível derivado de resíduo
CDRU	- Resíduo sólido urbano
CEMA	- Conselho estadual de meio ambiente
CF	- Silo <i>Continuous Flow</i>
CONAMA	- Conselho nacional do meio ambiente
EBITDA	- Lucro antes de juros, impostos, depreciação e amortização
EPI	- Equipamento de Proteção individual
ETE	- Estação de tratamento de efluentes
FFC	- Fator Farinha Clínquer
FSC	- Fator Saturação Cálcio
GAF	- Gás de Alto Forno
GN	- Gás Natural
IAT	- Instituto Água e Terra
IPT	- Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MA	- Módulo de alumínio
MS	- Módulo de sílica
NASA	- Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos
NBR	- Norma Brasileira
NOx	- Óxidos de nitrogênio
PCI	- Poder Calorífico Inferior
PCS	- Poder Calorífico Superior
PNRS	- Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC	- Policloreto de polivinila
REM	- Relação Estéril Minério

SNIC	- Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SOx	- Óxidos de enxofre
VC1	- Volume de controle 1
VC2	- Volume de controle 2
VDZ	- Associação Alemã de Fábricas de Cimento (<i>Verein Deutscher Zementwerke</i>)
XRD	- Análises por difratometria
XRF	- Análises por espectrometria raio X

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 A INDÚSTRIA DE CIMENTO	18
2.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CIMENTO	19
2.2.1 Mineração.....	20
2.2.2 Moagem de farinha	23
2.2.3 Silos de homogeneização	27
2.2.4 Torre de pré calcinação ou torre de ciclones.....	28
2.2.5 Clinquerização e resfriamento.....	29
2.2.6 Moagem e dosagem de combustíveis.....	32
2.2.7 Moagem de cimento	34
2.2.8 Formas de comercialização do cimento	38
2.3 MATRIZ DE COMBUSTÍVEIS	39
2.3.1 Utilização e classificação dos combustíveis.....	41
2.4 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS	50
2.5 BALANÇO TÉRMICO.....	55
2.5.1 Balanço de Massa.....	55
2.5.2 Balanço de Energia	56
3 MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS.....	60
3.1.1 Determinação de Umidade.....	62
3.1.2 Determinação de carbono fixo, voláteis e cinzas	63
3.1.3 Determinação do poder calorífico dos combustíveis	64
3.1.4 Determinação do teor de cloro dos combustíveis.....	67
3.1.5 Determinação do teor de enxofre dos combustíveis	69
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA FARINHA.....	70
3.2.1 Determinação da análise de óxidos da farinha.....	71
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO CLÍNQUER.....	73
3.3.1 Determinação das análises de óxidos e minerais do clínquer.....	73

3.4 MEDIÇÕES DE PROCESSO	74
3.4.1 Determinação do fator farinha clínquer (FFC) – Produtividade do forno	74
3.4.2 Medições de vazão, temperatura e pressão.....	75
3.4.3 Balanço térmico.....	77
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E ALTERNATIVOS.....	80
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA FARINHA.....	82
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CLINQUER.....	83
4.4 BALANÇO TÉRMICO	84
4.4.1 Produção do forno.....	84
4.4.2 Balanço térmico.....	85
4.4.3 Balanço Resfriador.....	87
4.4.4 Avaliação dos dados de processo.....	89
4.5 AVALIAÇÃO DO CUSTO DA ENERGIA	93
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
REFERÊNCIAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

O aumento do preço dos combustíveis de forma expressiva desde 2019 até o ano vigente, faz com que as empresas busquem alternativas para otimizar sua matriz energética em função da disponibilidade do mercado. Segundo Gomes (2012), a sociedade moderna tem buscado fontes alternativas de energia para minimizar a dependência de combustíveis fósseis com o foco na redução desta fonte energética.

O coque de petróleo é o principal combustível da indústria cimenteira brasileira e tem características físico – químicas bem estáveis, o que é uma grande vantagem para reatores químicos de temperatura controlada como é o caso dos fornos de clínquer. O contraponto tem sido os diversos reajustes sofridos devido ao aumento do preço do barril de petróleo. De acordo o site *investing.com* (2022), o barril de petróleo chegou a máximo histórica de \$ 139,00 em março de 2022, quase 170% de aumento comparado ao final do ano de 2020 quando a máxima chegou a 52 dólares.

A busca pela redução do coque tem sido o grande objetivo das indústrias de forma a gerar resultados econômicos sustentáveis. Desta maneira, a utilização de combustíveis alternativos (CA) ou combustíveis derivados de resíduos (CDR). O coprocessamento em fornos de clínquer nas cimenteiras, tem-se mostrado há muitos anos e em diversos países, inclusive no Brasil, uma das melhores opções para destinação de vários tipos de resíduos. O coprocessamento é uma tecnologia que utiliza resíduos específicos, como substitutos de energia ou de matéria-prima. Essa tecnologia pode substituir o combustível principal, ou seja, o coque de petróleo, sem gerar resíduos nesse processo, mostrando ser uma tecnologia limpa de destinação final de resíduos (ABCP 2016). O grande problema dos CA no Brasil é a qualidade do combustível ofertado, com uma granulometria mais grosseira que os combustíveis fósseis e excesso de umidade, as taxas de substituição ficam aquém das que são obtidas na Europa onde o coprocessamento e a qualidade dos combustíveis estão chegando a níveis superiores a 90% (PRIES 2018).

O carvão mineral, combustível muito utilizado nas décadas passadas e que tinha perdido espaço para coque de petróleo, voltou a figurar como uma oportunidade de negócio nestes últimos dois anos. Apesar de ter uma maior variabilidade química devido ao excesso de cinzas presentes na sua composição, o custo em R\$/GJ tem sido muito interessante comparado ao coque de petróleo (FAGUNDES 2021).

Este trabalho visa identificar oportunidades de redução de custos industriais focando na matriz de combustíveis da empresa Supremo Secil. A maximização de combustíveis alternativos, a reutilização de carvão mineral e a redução do coque de petróleo associados à estabilidade operacional da planta em conjunto com a qualidade do clínquer obtido serão os principais *drivers* de atuação deste trabalho.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a matriz de combustíveis na produção de clínquer, de forma a otimizar sua utilização em função dos custos relacionados a energia térmica.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a matriz de combustíveis, a nível energético (PCI e umidade) e análises de sua composição química os seguintes combustíveis: resíduos sólidos triturados, pneus, coque de petróleo e carvão mineral;
- Verificar a qualidade do clínquer em termos de módulos químicos e seus minerais em função da matriz de combustíveis utilizada;
- Verificar produtividade do forno em t/d em função da matriz energética utilizada através de balanço de massa e energia e com dados de processo em condições de estabilidade operacional;
- Fazer os cálculos de R\$/GJ dos combustíveis utilizados e seus impactos no custo operacional;

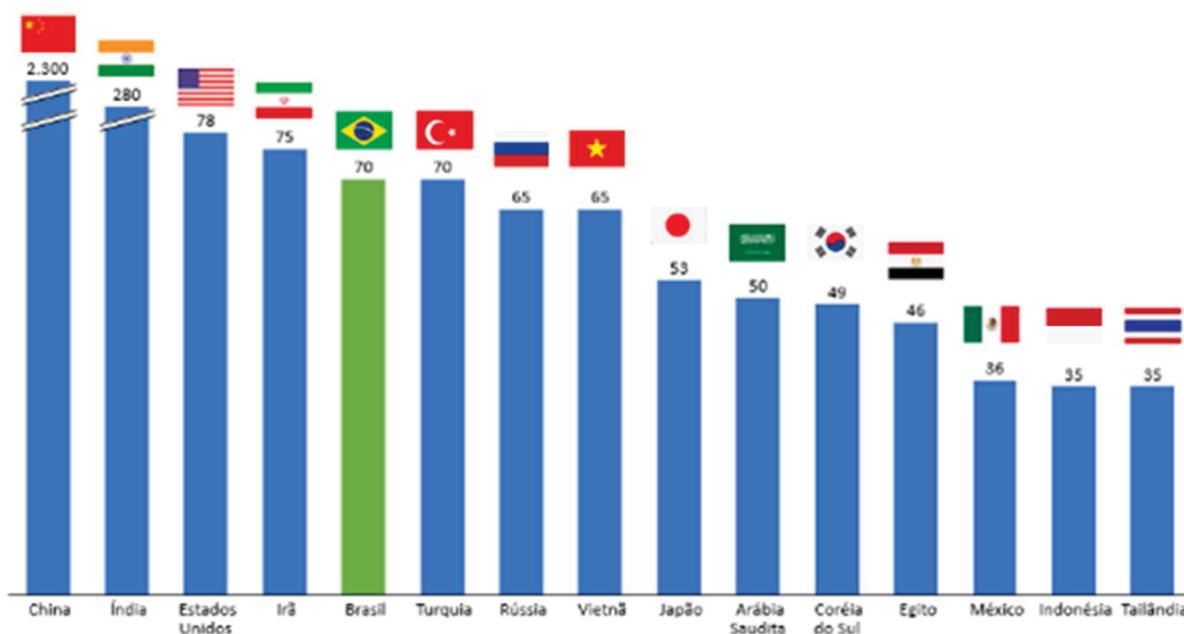
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A INDÚSTRIA DE CIMENTO

O cimento é uma commodity de baixo índice de substituição, presente em todo tipo de obra, das mais simples até as mais complexas, desde uma obra de caráter familiar como uma calçada até as grandes construções como uma barragem.

A China é o maior produtor de cimento do mundo com mais de 2,3 bilhões de toneladas produzidas em 2013 conforme é demonstrado na FIGURA 1. Na comparação do mesmo ano, o Brasil ocupava a 5ª posição com cerca de 70 milhões de ton. Pode-se considerar, que o Brasil é um grande competidor no mercado de cimento mundial, justificando toda a iniciativa de trabalhos acadêmicos com intuito de aumento de desempenho operacional e redução de custos industriais.

FIGURA 1 – PRODUÇÃO DE CIMENTO NO MUNDO (MILHÕES DE TON) DE 2013

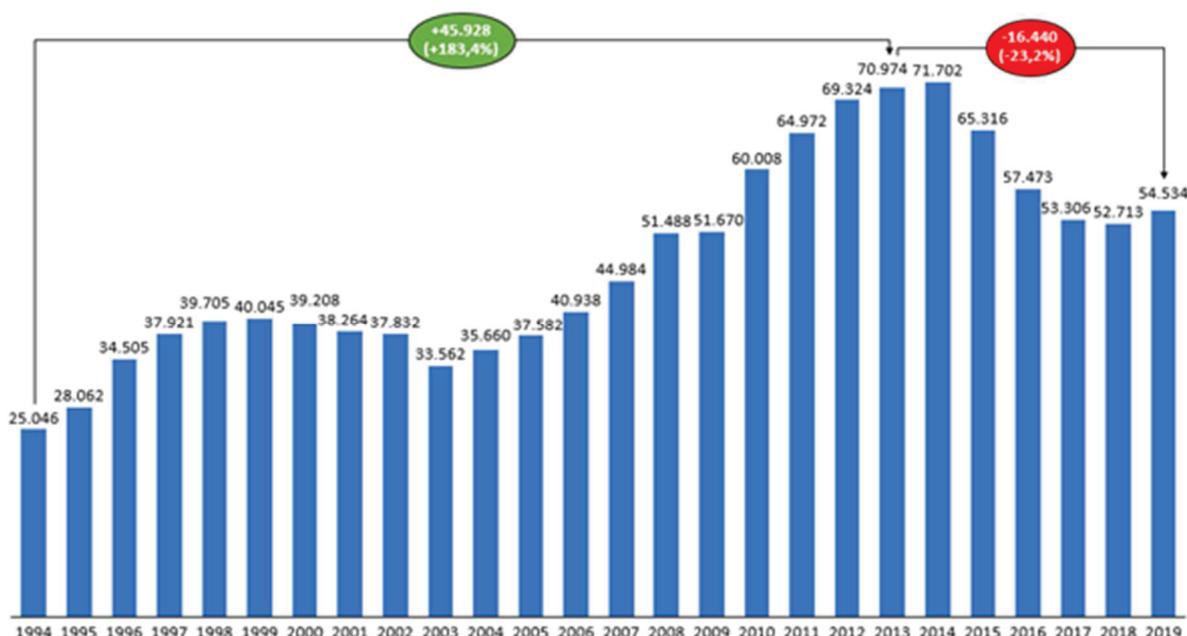


FONTE: Cimento.org (2021)

No Brasil atualmente tem-se 93 fábricas produtoras de cimento controladas por 23 grupos diferentes. O segmento teve um crescimento importante de 1994 até 2013,

conforme mostra a FIGURA 2. Este período teve uma grande elevação em termos de obra civil e infraestrutura no país. A partir de 2014, a produção de cimento inicia um período de queda e recessão. Em 2019, a indústria de cimento retorna à uma tendência de alta e cerca de 54,6 milhões de toneladas de cimento são produzidos e são gerados mais de mais de 19 mil empregos diretos no setor da construção civil. Certamente, o segmento tem uma importância significativa na economia brasileira e por consequência na sociedade (SNIC 2021).

FIGURA 2 – PRODUÇÃO DE CIMENTO NO BRASIL (MILHÕES DE TON) DE 1994 A 2019. PERÍODO PLANO REAL



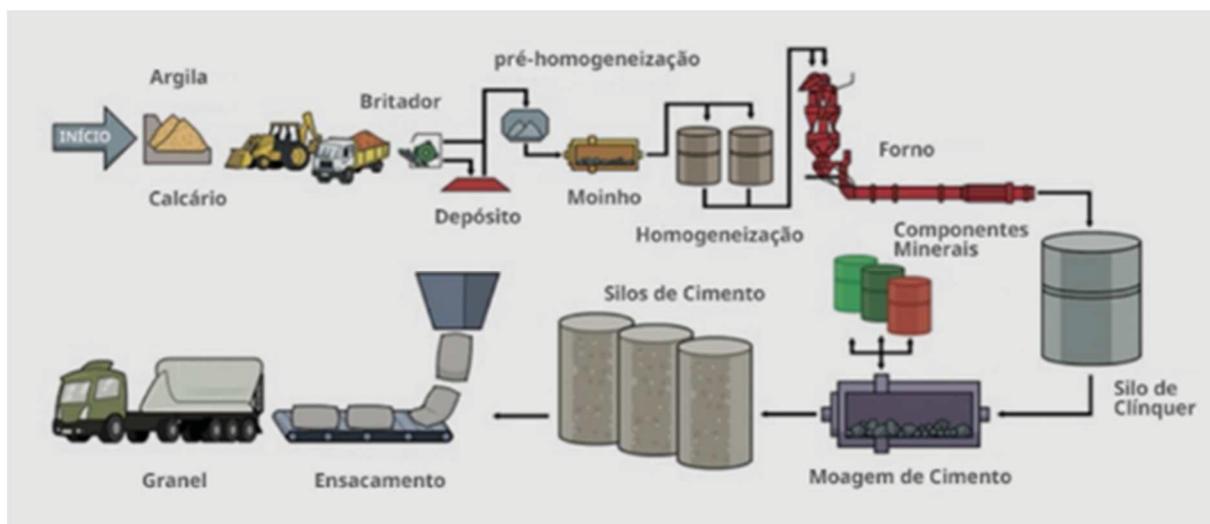
FONTE: Cimento.org (2021)

2.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CIMENTO

A produção de cimento é constituída de 08 etapas sendo elas a mineração, a moagem de matérias primas, mistura da farinha em silo de homogeneização, pré calcinação da farinha, moagem e dosagem de combustíveis fósseis e alternativos, clínquerização, resfriamento do clínquer, moagem de cimento e expedição. O principal subproduto da indústria de cimento é o clínquer. Os minerais que compõem o clínquer são os que conferem as características de aglomerante hidráulico

desejados nas aplicações do cimento e concreto. A FIGURA 3 representa o fluxograma das fábricas de cimento com forno de via seca com as respectivas etapas citadas anteriormente.

FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DE CIMENTO



FONTE: Supremo Secil (2021)

2.2.1 Mineração

A mineração é o processo de extração de minerais que na sua maioria constituem as matérias primas para produção de um determinado bem. No caso da indústria de cimento, a principal matéria prima para produção de clínquer e posteriormente o cimento, é o calcário ou carbonato de cálcio (CaCO_3), que compõem cerca de 95% no mix de matérias primas. O calcário também é adicionado na receita de produção dos cimentos classificados como F, casos do CP-II-F32, CP-II-F40, CPV-ARI, entre outros.

Uma boa gestão da mineração elabora planos de lavra de curto, médio e longo prazo, de forma a garantir um recurso adequado, ou seja, minério liberado para produção de clínquer e cimento.

A maioria das empresas produtoras de cimento possuem em seus ativos e bens, a reserva de calcário e os equipamentos necessários para sua exploração e beneficiamento.

Os principais indicadores técnicos de controle da mineração são:

- Relação de minério extraído e material estéril (REM – Relação Estéril Minério);
- Razão de carga de explosivos. Quantidade de explosivos por toneladas de calcário produzido;
- Consumo específico de óleo diesel. Em praticamente quase toda mineração, os equipamentos são moveis, os principais que se pode relacionar são as escavadeiras, motoniveladoras, caminhões fora de estrada, rompedores e perfuratrizes. O consumo de óleo diesel é elevado e tem impacto forte no custo de produção. A FIGURA 4 mostra um exemplo de modal utilizado em minerações com escavadeira e caminhões fora de estrada.

FIGURA 4 – CARREGAMENTO DE CALCÁRIO POR ESCAVADEIRA EM CAMINHÕES FORA DE ESTRADA

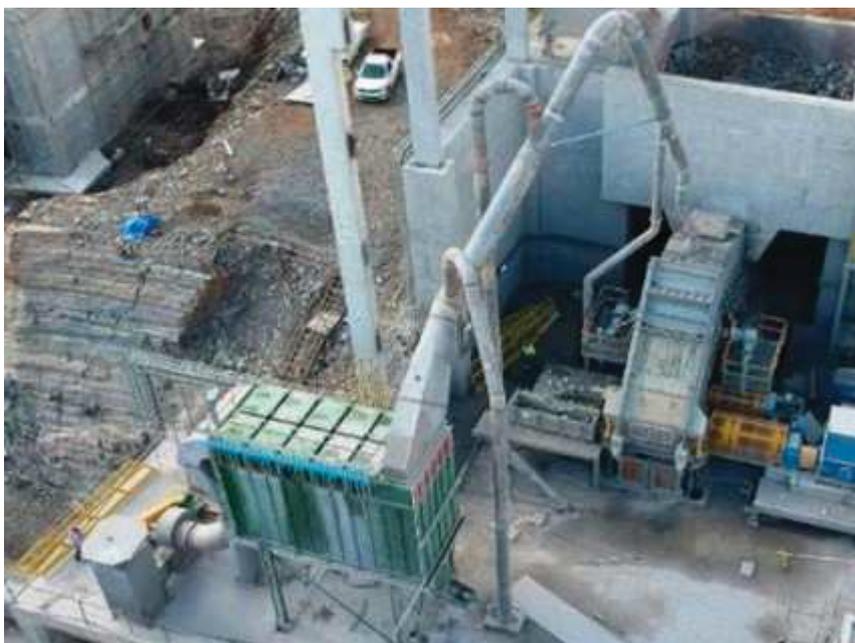


FONTE: Supremo Secil (2021)

O calcário extraído é transportado para um equipamento chamado de britador, no qual tem a finalidade de reduzir o material bruto em material britado a uma granulometria determinada. A maioria dos controles granulométricos preveem não ter material residual superior a 100mm. Toda vez que ocorre produção com material acima de 100mm é necessário realizar intervenções mecânicas para virar o conjunto

de martelos ou mesmo substituí-los. A FIGURA 5, mostra um modelo de britador de martelos. Martelos são um conjunto de componentes mecânicos que realizam a redução de granulométrica (SUPREMO SECIL 2021)

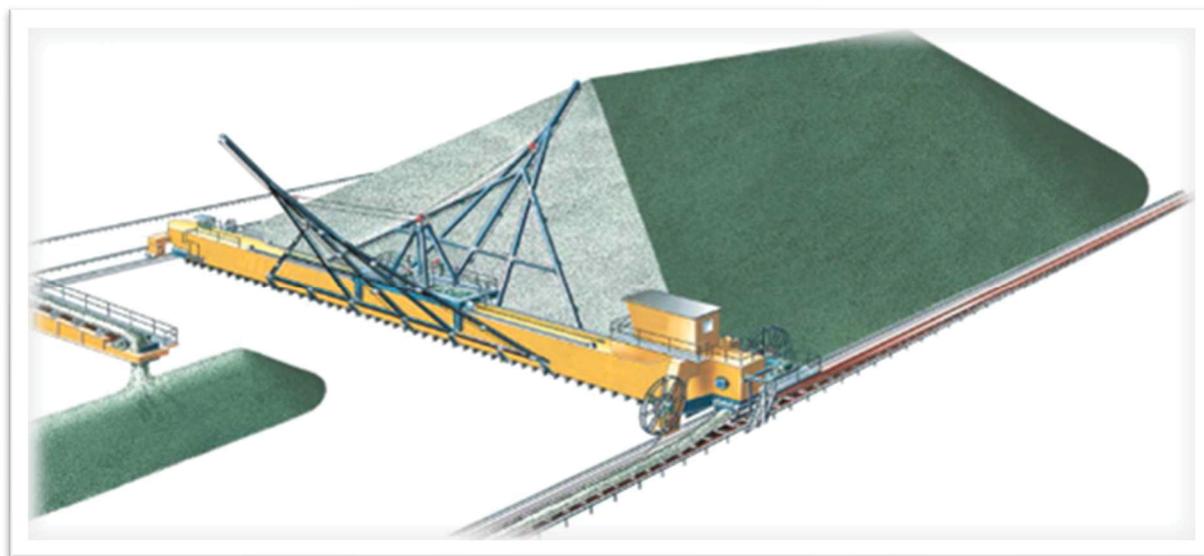
FIGURA 5 – BRITADOR DE MARTELOS



FONTE: Supremo Secil (2021)

O calcário britado da mineração é transportado para as fábricas por meio de correias transportadoras e são empilhados em diferentes tipos de metodologia para reduzir o desvio padrão da qualidade do material. Os métodos mais utilizados são o empilhamento Chevron e o circular. A FIGURA 6 elucida o método de confecção e posterior retomada por meio método Chevron. Esta metodologia, consiste em empilhamento no sentido longitudinal e retomada no sentido transversal (CIMENTO ITAU, 1995), porém o início e fim das pilhas apresentam maior variabilidade química e física além de ocorrer uma leve segregação de material na “saia” da pilha.

FIGURA 6 – RETOMADA DE PILHA DE CALCÁRIO MÉTODO CHEVRON



FONTE: FLSmidth (2012)

2.2.2 Moagem de farinha

Após as etapas de mineração e pré homogeneização, o calcário não tem todas as características químicas necessárias para produção de clínquer. São necessárias adições de outros minérios para que possa se obter a qualidade necessária. A mistura do calcário com outras matérias primas minoritárias é chamada de **farinha**. A farinha é composta de majoritariamente calcário, fonte principal de cálcio, argilas e bauxitas, fontes de alumínio, areia e materiais silicosos, fontes de sílica, e no minério de ferro, fonte de ferro.

A jazida de argila está situada geralmente dentro da unidade fabril produtora de cimento ou na sua mineração. É um minério de fácil extração, não necessitando grandes operações unitárias para sua utilização. A operação usual é apenas uma separação por peneira fixa para segregar “torrões” de argila. O custo deste material é muito baixo face a outras adições que são compradas pelas empresas.

A bauxita é uma rocha composta por minerais hidratados de alumínio. Tais minerais são formados nos processos de intemperismo e alteração de rochas aluminosas, em clima tropical e subtropical (Villar 2002). É rica em ferro e alumínio e pobre em silício e metais alcalinos. Segundo Pinheiro (2016), as principais reservas

de bauxita estão no Pará (90%), Minas Gerais (7%), São Paulo e Goiás (3%). É uma matéria prima cara e por isso só deverá ser considerada no composto da farinha, caso as argilas das indústrias cimenteiras, sejam pobres em alumínio e ricas em sílica.

A areia é uma matéria prima, assim como as argilas, muito próxima às fábricas, pois são fornecidas por empresas que exploram os leitos de rios. A utilização de areia deve ser limitada na indústria devido ao seu papel abrasivo, aumentando desgaste dos equipamentos e por ser fonte de quartzo (SiO_2), no qual é um composto de difícil queima em fornos de clínquer aumentando o consumo térmico, ou seja, consumindo mais combustíveis. (CIMENTO ITAU, 1995)

O último componente da farinha a ser citado é o minério de ferro. Tradicional mineral utilizado na indústria do aço, também tem um papel importante no cimento, porém com necessidade de pequenos teores. O minério de ferro, assim como a bauxita, é adquirido por altos valores em R\$/t material e devem ser otimizados na formação da farinha.

A TABELA 1, mostra uma composição em massa típica de cada mineral a ser utilizado para formação da farinha.

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE FARINHA

Matérias Primas	Principal Substância Química	% Composição farinha em massa
Calcário	CaCO_3 – Carbonato de cálcio	95,00
Argilas / Bauxita	Al_2O_3 – Óxido de alumínio	3,60
Areia	SiO_2 – Dióxido de silício	0,50
Minério Ferro	Fe_2O_3 – Óxido Férrico	0,90

FONTE: adaptado de Supremo Secil (2021)

Para obter o percentual mássico de cada matéria prima conforme elucidado na TABELA 1, é necessário fazer o controle químico da farinha em função das análises químicas individuais de cada mineral.

O controle químico da farinha produzida é feito por módulos no qual relaciona os principais elementos químicos das matérias primas: Ca, Si, Al, Fe. Nas fábricas de cimento, este controle de módulos é feito de forma automática utilizando modelos matemáticos que recebem análises elementares online.

Os principais módulos de controle conforme FARENZENA (1990) estão relacionadas com as equações de 1 a 3 e são FSC (Fator de Saturação em Calcio), MA (Módulo de alumínio) e MS (Módulo de sílica).

$$FSC = \frac{(100 \times Ca)}{(2,8 \times Si + 1,65 \times Al + 0,35 \times Fe)} \quad (1)$$

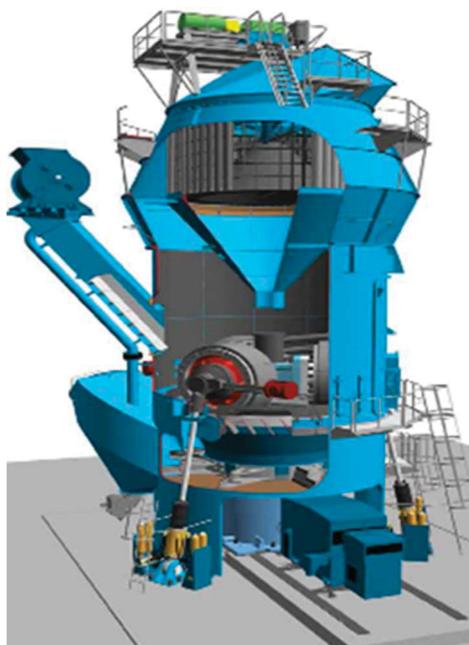
$$MA = \frac{Al}{Fe} \quad (2)$$

$$MS = \frac{Si}{(Al + Fe)} \quad (3)$$

O controle de módulos é fundamental para estabilidade operacional e de combustão. Cada forno apresenta seu ajuste característico, se os módulos estiveram muito “alto” ocorre uma dificuldade da queima da farinha e por consequência aumento do consumo de combustíveis. O oposto, módulos muito baixos, tem-se uma facilidade a queima com redução de combustíveis, porém favorecendo o efeito de formação de colagens e incrustações. O ajuste dos módulos influencia também a qualidade dos cimentos produzidos. Em vista disso, é relevante ter uma equipe técnica qualificada para garantir o bom controle de qualidade em todas as etapas do processo.

Concomitantemente ao ajuste de qualidade química da farinha, o processo de moagem está ocorrendo. Os equipamentos usuais para esta operação são os moinhos de bolas e os moinhos verticais, sendo estes últimos mais modernos com menor gasto energético. A mistura é finamente moída e tem sua finura controlada entre 10 -12% retido na peneira de 90 μ m. A FIGURA 7 ilustra um moinho vertical tipo ATOX da empresa FLSmidth.

FIGURA 7 – MOINHO VERTICAL DE FARINHA



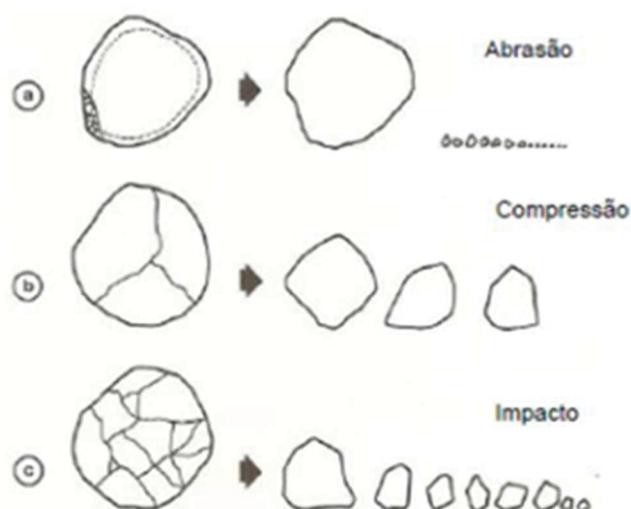
FONTE: FLSmidth (2012)

Os moinhos verticais representam a tecnologia mais moderna em termos de cominuição de partículas. A moagem de farinha recebe materiais com granulometrias inferiores a 100mm e produzem partículas com controle de finura inferior a 90 μ m. Segundo Kelly & Spotiswood (1982), existem três tipos de fraturas presentes nos processos de cominuição nos quais são descritos abaixo e na FIGURA 8:

- **Abrasão:** aplicação de força de forma insuficiente para provocar uma fratura em toda a partícula. Há a concentração de esforços localmente, que provoca o aparecimento de pequenas fraturas, com o surgimento de uma distribuição granulométrica de partículas finas ao lado da partícula original, cujo diâmetro é pouco diminuído;
- **Compressão:** aplicação de força de forma lenta onde o esforço é aliviado com o aparecimento de fraturas. Desse tipo de fratura resultam fragmentos de diâmetros equivalentes. Este tipo de mecanismo é típico em britadores (mandíbulas, giratórios e cônicos) e em moinhos quando as partículas são comprimidas entre os corpos moedores, rolos e/ou partículas maiores;
- **Impacto:** aplicação de força de forma rápida e em intensidade muito superior à resistência da partícula. Mecanismo encontrado em britadores de impacto ou

em moinhos industriais. A resultante deste mecanismo é uma distribuição de partículas finas.

FIGURA 8 – MECANISMOS DE COMINUIÇÃO



FONTE: Kelly & Spotiswood (1982)

Os moinhos verticais utilizam de um sistema hidropneumático para pressionar os rolos de moagem contra uma camada de material em cima de uma mesa giratória otimizando os mecanismos de cominuição de forma eficiente. Além de promover a moagem propriamente dita, o equipamento permite a secagem de material porque utiliza uma vazão de gases quentes para carrear o material com a finura desejada e tem incorporado um separador fixo e móvel para classificação granulométrica de material. Segundo o catálogo técnico da FLSmidth (2015), os moinhos verticais apresentam uma vantagem interessante com relação aos moinhos de bolas, por ter um nível de ruído baixo e uma economia na demanda de energia elétrica superior a 30%.

2.2.3 Silos de homogeneização

A farinha finamente moída é direcionada para o silo de homogeneização chamada de silo *Continuous Flow*, ou silo CF. O silo CF tem a função de reduzir o desvio padrão da farinha produzida em até 8 vezes conforme projetado elaborado por FLSmidth (2012). Quanto menor o desvio da farinha que será alimentada ao forno de

clínquer, melhor será a estabilidade operacional e a otimização da matriz de combustíveis.

O silo CF, recebe esta nomenclatura porque evita o efeito de fluxo funil dentro de silos. O fluxo contínuo é obtido por sistema de fluidização e por controle de abertura de válvulas na sua extração, fazendo que sua descarga de material ocorra ao longo de toda a saída minimizando efeito de segregação de material dentro do silo (DUDA, 1985). A FIGURA 9 apresenta de forma esquemática o funcionamento de um silo CF.

FIGURA 9 – SILO CONTINUOUS FLOW (SILO CF)



FONTE: FLSmidth (2011)

2.2.4 Torre de pré calcinação ou torre de ciclones

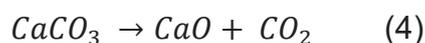
A torre de pré calcinação ou torres de ciclones é o início da fase de reações químicas do processo. A farinha produzida na moagem de farinha e homogeneizada pelo silo CF é agora alimentada na torre de pré calcinação. A farinha segue um fluxo descendente na torre sendo contracorrente aos gases gerados pela combustão e pela descarbonatação dos carbonatos de cálcio e magnésio. A torre de pré calcinação funciona como um grande trocador de calor estacionário e sua eficiência dependerá

muito dos equipamentos que a compõem e do tempo de residência do material. Uma torre com 5 ou 6 ciclones mais um calcinador, são os modelos mais modernos e com maior eficiência de troca térmica. A farinha entra no processo da torre por volta de 60°C e é controlada por volta de 880°C no último estágio da torre ciclones. Logo em seguida é a entrada do forno de clínquerização. (Anacleto 2021)

A descarbonatação, principalmente do carbonato de cálcio CaCO_3 , ocorre nesta etapa, produzindo CO_2 como efluente gasoso e CaO para as futuras reações de clínquerização. (Pries 2018; Anacleto 2021; Silva 2022)

2.2.5 Clínquerização e resfriamento

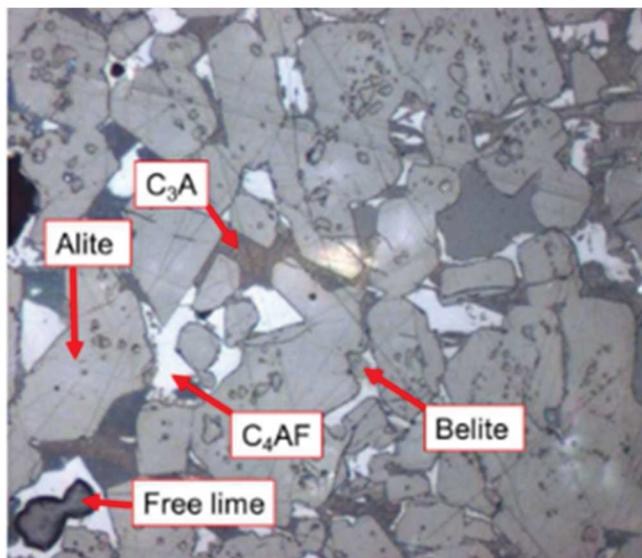
A produção do clínquer ocorre dentro do forno rotativo, no qual os minerais que compõem o clínquer são formados através de reações químicas. Segundo SILVA et al. (2018), a farinha proveniente da torre de ciclones, foi aquecida até o intervalo de temperatura entre 860 e 880°C. Nestas temperaturas, a carbonatação do calcário, ou seja, a decomposição do carbonato de cálcio em óxido de cálcio e gás carbônico já ocorreu em quase toda sua totalidade conforme indicado na equação 4.



A partir de então, as principais reações envolvidas no processo estão relacionadas com os 04 principais óxidos: cálcio (CaO), sílica (SiO_2), alumínio (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3). A partir destes compostos, são formados os minerais do clínquer conforme ilustrado na FIGURA 10, sendo estes:

- Silicato Tricálcico, $(\text{CaO})_3.\text{SiO}_2$, conhecido como alita ou C3S;
- Silicato Dicálcico, $(\text{CaO})_2.\text{SiO}_2$, conhecido como belita ou C2S;
- Aluminato Tricálcico, $(\text{CaO})_3.\text{Al}_2\text{O}_3$, conhecido como C3A;
- Alumino ferrato Tricálcico, $(\text{CaO})_4.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$, conhecido como C4AF;

FIGURA 10 – MICROSCOPIA DO CLÍNQUER



FONTE: VDZ (2012)

As reações de clinquerização exigem um conjunto complexo de circunstâncias para sua efetivação. Para que a belita se converta em alita na forma de cristais homogêneos e do tamanho ideal, é necessária a fundição dos óxidos de ferro e alumínio, formando uma fase líquida que permite o melhor contato entre o cálcio e a belita, favorecendo a ocorrência da reação. Além disso, a viscosidade da fase líquida formada, que é diretamente dependente da proporção entre ferro (fase líquida mais fluida) e alumínio (fase líquida mais viscosa), é importante para a formação de grãos do produto na granulometria adequada no primeiro resfriamento que ocorre ainda no forno rotativo. (ANACLETO 2021)

O processo de clinquerização descrito, assim como a fase anterior de calcinação do carbonato de cálcio, exige altas temperaturas para sua efetivação. As reações endotérmicas que ocorrem durante a produção do clínquer são responsáveis pelo maior consumo de energia térmica do processo. A TABELA 2, relaciona os ranges de temperatura necessários para que cada etapa do processo ocorra. A maioria das reações citadas são de caráter endotérmico, ou seja, necessitam de uma fonte de calor que possam ocorrer e segundo Faria (2018), a média de processos eficientes na produção de clínquer consomem cerca de 3000 a 3500 MJ/t clínquer. A energia térmica em conjunto com a energia elétrica são responsáveis por praticamente 50% dos custos totais de produção.

TABELA 2 – RESUMO DAS REAÇÕES DE DESCARBONATAÇÃO E CLINQUERIZAÇÃO

Faixa de temperatura, °C	Reações químicas
100	Secagem de água superficial
100 – 250	Liberação de água ligada
550 – 600	Início descarbonatação CaCO_3
600 – 800	CaO livre 2%
Maior > 800	CaO livre 20%
Maior > 900	Início reações elementos Al, Fe e Si
800 – 1250	Formação de C3A, C2S e C2AF
1250	Formação de C3S a partir de C2S
1280	Formação de fase líquida
1450	Balanço final das fases minerais do clínquer

FONTE: adaptado VDZ (2012)

É importante salientar que existem elementos minoritários na composição da farinha que constituem da mesma forma o clínquer em percentual inferior a 5%, e tem impactos importantes em controle de processo. Estes elementos são Na, K, Mg e S, nos quais são mensurados na sua forma de óxidos: Na_2O , K_2O , MgO , SO_3 . A avaliação dos elementos minoritários é fundamental para constatação e controle de incrustações no forno e na torre de pré calcinação, além de ter reflexos significativos na qualidade dos cimentos produzidos. (BHATTY, 1995)

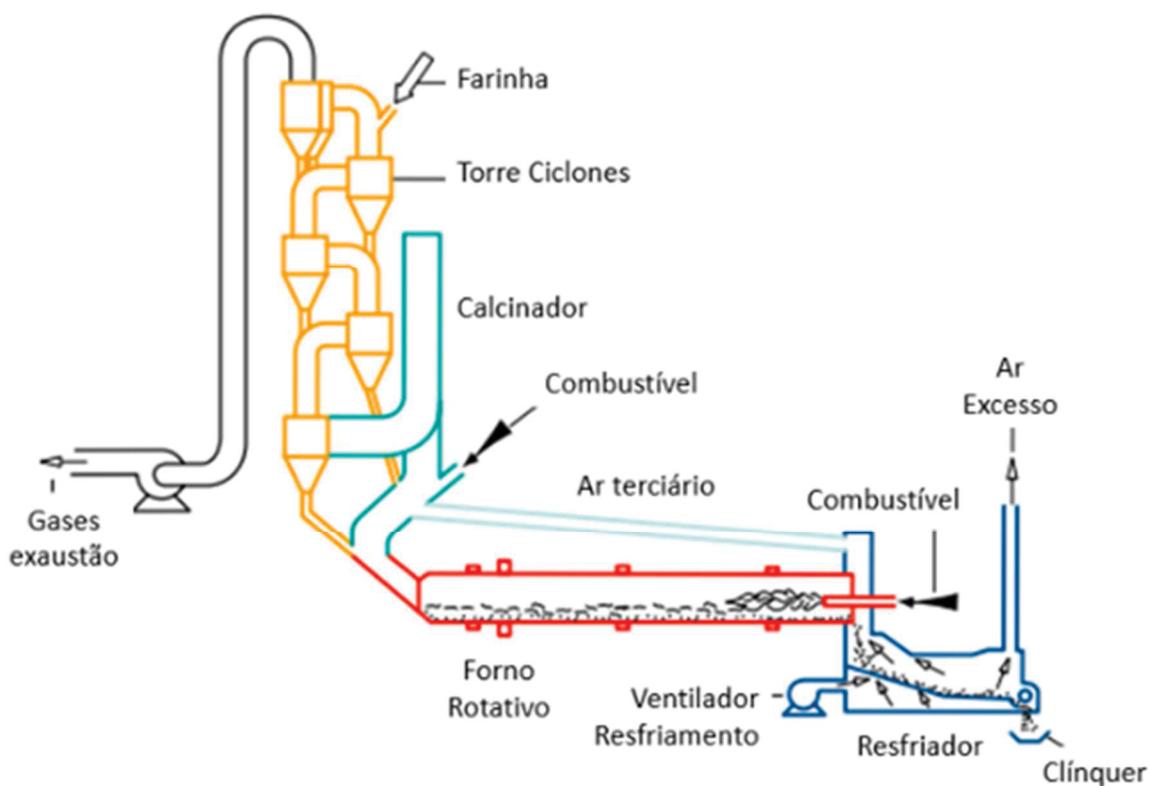
O resfriamento é tratado em conjunto com o forno de clinquerização. O resfriamento do clínquer ocorre é um equipamento chamado de **Resfriador** e tem como objetivo recuperar a energia do clínquer produzido a 1450°C. O ar frio introduzido no resfriador de clínquer através de ventiladores, trocam calor diretamente com clínquer por meio de condução e convecção, uma parcela deste ar aquecido entra no forno para compor o ar de combustão e é intitulado de ar secundário. A outro parcela, é direcionada para o calcinador, localizado na torre de ciclones, onde também ocorre o processo de combustão. Esta parcela é o ar terciário. (AHAMED et al., 2012)

O processo de recuperação de calor no clínquer é fundamental para uma boa estabilidade de processo e economia de combustíveis. O ar aquecido entra como fonte de energia para o processo e o clínquer frio (temperatura menor que 250°C)

minimiza o desgaste mecânico dos equipamentos subsequentes de transporte e armazenagem.

A FIGURA 11, representa do processo de pré-aquecimento, descarbonatação, clínquerização e resfriamento de forma integrada.

FIGURA 11 – PROCESSO INTEGRADO DE PRÉ CALCINAÇÃO, CLINQUERIZAÇÃO E RESFRIAMENTO



FONTE: VDZ 2012

2.2.6 Moagem e dosagem de combustíveis

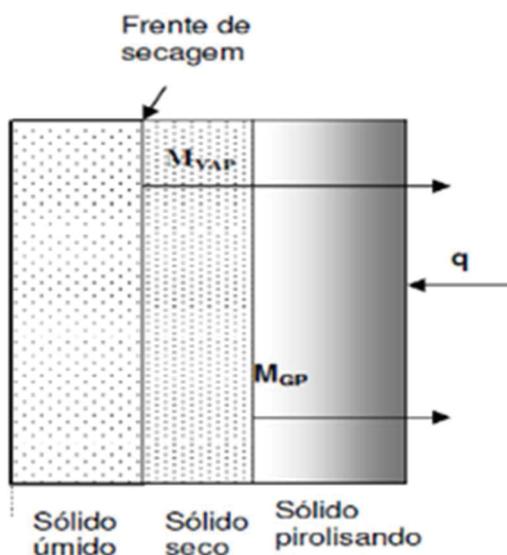
A utilização de combustíveis fósseis nas indústrias de cimento representa cerca de 85% da matriz de combustíveis e que são representados na sua grande maioria pelo coque de petróleo (baixo e alto enxofre, S), carvão mineral, óleos combustíveis e gás natural. O restante da matriz está destinada aos combustíveis alternativos que tem ganhado cada vez mais importância no cenário econômico e ambiental. (BATTAGIN; CARDOSO, 2018)

No final dos anos 90 foi desenvolvida a tecnologia do coprocessamento de resíduos no qual permitiu as cimenteiras reduzir o consumo de combustíveis fósseis e queimar materiais antes destinados à aterros sanitários. Pneus picados, resíduos classe I e II, resíduos pastosos e líquidos e blends de resíduos tem sido uma alternativa sustentável para redução de material para aterro sanitário e redução de custos industriais, uma típica relação de ganha-ganha (*win-win*). (FAGUNDES, 2021)

Os combustíveis fósseis são processados através da moagem de combustíveis. O equipamento mais usual é o moinho vertical similar ao da moagem de farinha.

É necessário moer finamente as partículas dos combustíveis para facilitar a cinética de combustão de materiais sólidos, uma referência de finura desejada é manter 15% de material retido na peneira de 45 μ m. De acordo com manual de combustão desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2010), a combustão de materiais sólidos, ocorre em 04 etapas conforme FIGURA 12: aquecimento, secagem, pirólise e combustão. Em resumo, quanto mais fino o combustível maior eficiência terá a combustão no queimador principal e no calcinador.

FIGURA 12 – ETAPAS PROCESSO DE COMBUSTÃO DOS SÓLIDOS



FONTE: IPT (2010)

Os combustíveis alternativos podem ser processados nas fábricas de cimento ou já apresentam um *blend* pronto para consumo. A granulometria média é de 25 a 50mm, dimensões consideradas grosseiras para uma combustão industrial em queimadores de última geração. O consumo é feito em sua grande maioria no

calcinador da torre de pré-calцинаção, porque é um reator estacionário de grande diâmetro e alto tempo de residência, permitindo assim a combustão de partículas maiores. Um indicador de boa combustão de combustíveis alternativos é o percentual de CO na saída da torre de ciclones (DYNAMIS 2021). Quando esta variável tem a tendência de aumento, significa que combustão incompleta e perda de eficiência do processo.

O transporte e dosagem de combustíveis alternativos para calcinador ocorrem por meio de transportadores tipos fundo móvel ou piso móvel e correia tubular insuflada. A dosagem é feita por equipamentos compostos por pequenas moegas e roscas ou válvulas rotativas com velocidade variável e células de cargas. Como os combustíveis alternativos apresentam qualidade muito variável, os dosadores precisam ser muito confiáveis nas suas medições de vazão mássica dado a necessidade de estabilidade de processo. A FIGURA 13 mostra um exemplo de dosador de combustíveis alternativos sólidos posicionado na torre de pré calcinação.

FIGURA 13 – DOSADOR DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA TORRE DE PRÉ CALCINAÇÃO



FONTE: Supremo Secil (2021)

2.2.7 Moagem de cimento

O clínquer produzido é estocado, e direcionado para a moagem de cimento, onde é finamente moído juntamente com os aditivos de moagem que são, o calcário

filer, gesso, escórias, cinzas, pozolana. A seguir serão descritos de forma sucinta os principais aditivos que compõem o cimento.

O **clínquer**, principal componente dos cimentos, é um mineral sintético que confere as características de ligante hidráulico. De acordo com o descrito por Farenzena (1995), os aglomerantes hidráulicos são todos os compostos que necessitam de água para reagir, uma vez hidratado, ele adquire uma estrutura rígida e compacta, não retornando mais à sua condição original.

O **calcário filer** é moído em conjunto com todos os aditivos com objetivo de diminuir os espaços vazios, melhorar a trabalhabilidade, o acabamento e até pode ganhar resistência inicial. (ITAMBÉ 2002).

O **gesso** apresenta-se na natureza em grandes jazidas sedimentares chamadas de evaporitos sob a forma de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), hemi-hidratado ou bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4). A gipsita é a forma mais usada na indústria cimenteira. O gesso é usado no cimento para regular o tempo de pega, ou seja, mantê-lo trabalhável por mais tempo e isto funciona na medida em que esta forma uma espécie de película ou membrana que envolve as partículas do cimento, retardando seu endurecimento. É um produto de adição final do processo. O gesso está presente em todos os tipos de cimentos Portland: CPI; CPI-S; CII-E; CII-Z; CII-F; CP III; CP IV e CP V-ARI. (LIMA 2011)

A **escória de alto forno**, pode ser adicionada ou não, dependendo-se do tipo de cimento que se quer obter. Segundo Lima (2011), há cimentos com até 65% de escória, ou seja, cimento denominado cimento de alto forno. A escória de alto forno possui propriedades aglomerantes, só que estas propriedades não são ativadas pela água e sim pelo hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ proveniente da hidrólise do CaO , ajudando assim na resistência final do cimento. A escória de alto forno está na composição dos cimentos CII-E e CP-III conforme é ilustrado no QUADRO 1.

Os **materiais pozolânicos** são produtos naturais e artificiais, constituídos essencialmente por sílica e alumina, que por si só possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante e hidráulica, entretanto quando preparados adequadamente (moídos), exibem a propriedade de reagir em meio aquoso e a temperatura ambiente com o hidróxido de cálcio, proporcionando a formação de novos compostos, com propriedades aglomerantes (cimentícias) e, portanto, insolúveis em água. Em tecnologia de cimento, pozolana é todo o material silicoso ou sílico – aluminoso capaz de fixar a cal hidratada ou $\text{Ca}(\text{OH})_2$, proveniente da hidratação dos compostos

constituintes do clínquer, concorrendo dessa forma para a melhoria de diversas propriedades e características físico-químicas do cimento, tais como: resistência a esforços mecânicos, plasticidade, durabilidade, entre outros (FARENZENA 1995, FERNANDES 2007).

Os aditivos escolhidos são em função do cimento que será produzido em cada unidade e deve respeitar a norma ABNT NBR 16697 de 2018. Os QUADROS 1 e 2 foram extraídas da nova norma citada e retrata os tipos de cimento e suas adições.

QUADRO 1 – DESIGNAÇÃO NORMALIZADA, SIGLAS E CLASSES DO CIMENTO PORTLAND

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b —
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c	
	Não estrutural	CPB	—	—

FONTE: ABNT NBR 16697 (2018)

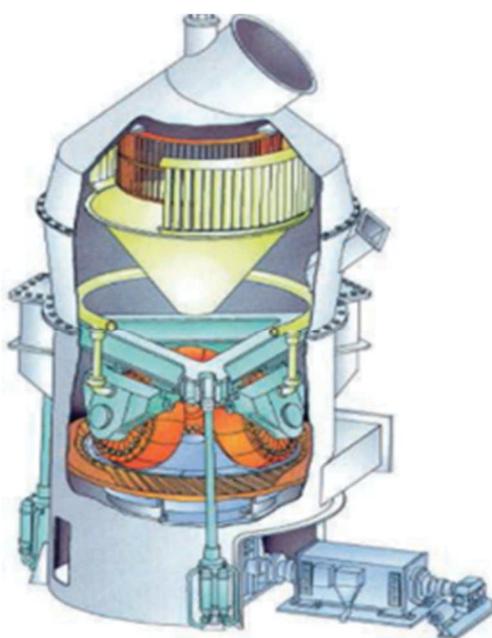
QUADRO 2 – LIMITES DE COMPOSIÇÃO DO CIMENTO PORTLAND (% EM MASSA)

Cimento Portland (ABNT)	Tipo	Clinker + Sulfato de Cálcio (%)	Escória de alto-forno (%)	Material pozolânico (%)	Material carbonático (%)
CP I	Comum	95 - 100		0 - 5	
CP I-S	Comum	90 - 94	0	0	6 - 10
CP II-F	Composto	75 - 89	0	0	11 - 25
CP II-E	Composto	51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
CP II-Z	Composto	71 - 94	0	6 - 14	0 - 15
CP III	Alto-forno	25 - 65	35 - 75	0	0 - 10
CP IV	Pozolânico	45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
CP V	Alta Resistência Inicial	90 - 100	0	0	0 - 10

FONTE: ABNT NBR 16697 (2018)

Os equipamentos utilizados para a operação da moagem dos cimentos são os moinhos de bolas e moinhos verticais. As FIGURAS 14 e 15 ilustram cada equipamento. Os moinhos verticais são mais modernos e apresentam redução em consumo específico de energia. Além disso, são muito similares ao funcionamento da moagem de farinha. Os moinhos de bolas são os mais comumente utilizado no parque fabril cimenteiro.

FIGURA 14 – MOINHO VERTICAL DE CIMENTO



FONTE: VDZ (2012)

FIGURA 15 – MOINHO DE BOLAS DE CIMENTO



FONTE: VDZ (2012)

2.2.8 Formas de comercialização do cimento

O cimento ensacado destina-se a clientes de menor consumo ou que não possuam silo de armazenagem e podem ser comercializados em embalagens de 50 kg e de 25 kg, permitindo maior versatilidade ao consumidor que compra pequenas quantidades de cimento. As embalagens são confeccionadas em papel Kraft, no qual estão estampadas diversas informações como: composição do produto, cuidados com o manuseio, data de fabricação e validade, indicação para melhor utilização e dicas de armazenagem. Usualmente, o cimento ensacado tem validade de 90 dias, após esta data, corre-se o risco de hidratação do cimento.

O cimento a granel é destinado a consumidores de grande porte, normalmente consumidores industriais e concreteiras, onde suas instalações são dotadas de silos de armazenagem. O cimento é entregue ao cliente em caminhões, usualmente conhecidos como “cebolão” conforme mostra a FIGURA 16.

FIGURA 16 – CAMINHÃO CEBOLÃO



FONTE: Supremo Secil (2022)

2.3 MATRIZ DE COMBUSTÍVEIS

Na década de 70, carvão e óleo pesado eram as principais fonte de energia. A partir dos anos 90, o carvão mineral foi substituído parcial ou integralmente pelo coque de petróleo. No final dos anos 90 e início do novo século, a entrada dos combustíveis alternativos foi uma grande novidade na indústria, com as empresas recebendo receita para o coprocessamento. Desde então, o mercado e as indústrias evoluíram em tecnologia para suportar um acréscimo de coprocessamento e os alternativos ganharam força de mercado, sendo hoje valorados em R\$/GJ fornecido. (BIZZO, 2003)

De acordo com Marques (2000), para produção de 01 kg de clínquer são necessários cerca de 3.140 kJ/kg ou 750 kcal/kg para fornos com tecnologia mais modernas contendo com 5 ou 6 estágios e calcinador e 5.000 kJ/kg ou 1200 kcal/kg para fornos com tecnologia mais antiga. Esta energia suprida por uma matriz de combustíveis com diversas características físico-químicas específicas e custos diferenciados.

A seleção do tipo de combustível depende de alguns parâmetros energéticos – econômicos como disponibilidade de calor que este fornecerá para o processo, custo de aquisição do material, disponibilidade no mercado, facilidade de escoamento

através dos modais logísticos, possibilidade de utilização dentro da tecnologia existente na fábrica e necessidade de investimento.

De ponto de vista de origem, os combustíveis podem ser classificados como fósseis (não renováveis) e vegetais (renováveis). O QUADRO 3, mostra a classificação dos combustíveis conforme sua origem.

QUADRO 3 – CLASSIFICAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS CONFORME SUA ORIGEM

Origem	Combustível Básico	Derivado
FÓSSEIS	Petróleo	GLP Gasolina Óleo Diesel Óleo Combustível Óleos Residuais
	Gás Natural	
	Xisto Betuminoso Carvões Minerais	Gases manufaturados
VEGETAIS	Cana-de-açúcar	Bagaço de cana Alcool Etílico
	Lenha	Carvão Vegetal Gases manufaturados Metanol
	Resíduos Vegetais	Biogás

FONTE: BIZZO (2003)

Tradicionalmente, a indústria de cimento utiliza combustíveis sólidos fósseis como maior percentual da sua matriz de combustíveis.

Os combustíveis industriais apresentam em sua composição alguns elementos químicos e compostos tais como: Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O), Enxofre (S), Nitrogênio (N), Água (H₂O), Cinzas (Z), sendo estas últimas compostas por diversos compostos inorgânicos.

O carbono e o hidrogênio são os elementos que mais contribuem para o acréscimo do poder calorífico. O enxofre também é um elemento que contribui na geração de calor, porém, tem efeito colateral que é a geração de compostos de SO₂

e SO_3 que em contato com umidade, causam corrosão na instalação industrial e são os agentes causadores de chuva ácida via H_2SO_4 . (VLASSOV, 1998)

O oxigênio e nitrogênio são elementos que usualmente reduzem o poder calorífico. O nitrogênio é o responsável pela formação do complexo chamado de NO_x , nos quais estão os seguintes compostos N_2O , NO , NO_2 que reagem com o ozônio da atmosfera O_3 . (BIZZO, 2003)

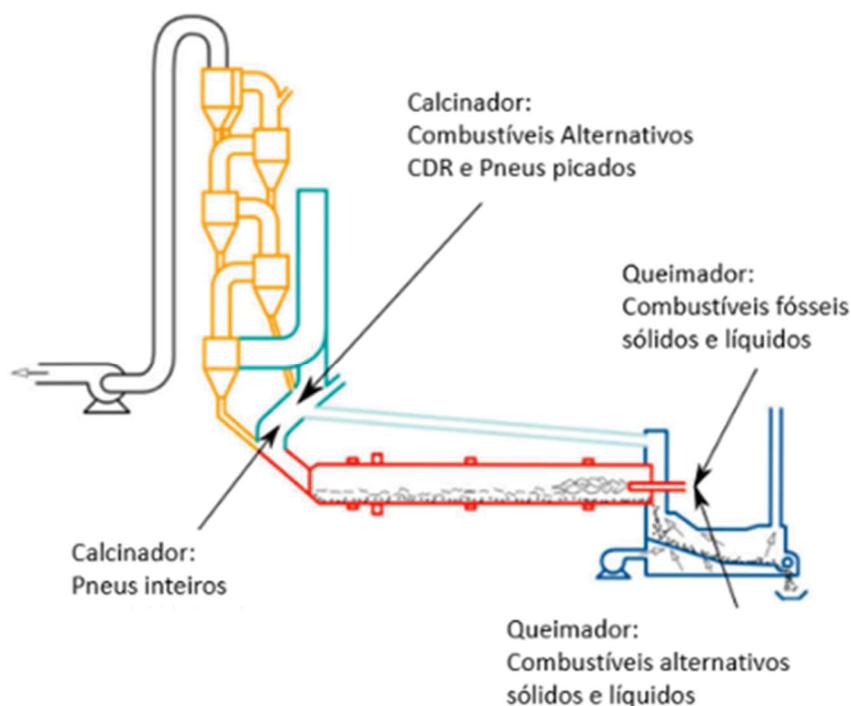
2.3.1 Utilização e classificação dos combustíveis

A utilização do combustível na indústria de cimento é o fornecimento de energia térmica para produção de clínquer. Esta energia é necessária para:

- Aquecer e secar a alimentação de farinha na torre de pré calcinação;
- Fazer a calcinação da farinha alimentada;
- Realizar as reações químicas para formação de novos materiais
- Formação dos minerais de clínquer.

Os combustíveis podem ser introduzidos no processo em diferentes posições sendo primordialmente no queimador principal que está localizado no cabeçote do forno e no calcinador fazendo parte da torre de pré calcinação. A FIGURA 17, representa de forma esquemática a injeção dos combustíveis.

FIGURA 17 – ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS NO PROCESSO DE CLINQUERIZAÇÃO



FONTE: VDZ 2012

2.3.1.1 Óleo leves e pesados

Os óleos pesados eram muito utilizados nas décadas de 70 até meados de 90. Os chamados óleos 2A variavam em função dos teores de enxofre que tinham em sua composição elementar e isto ocorria face ao tratamento sofrido durante o seu refino. (FARENZENA, 1990). A TABELA 3, mostra as características químicas do óleo 2A. Os termos TBTS, significa baixo percentual de enxofre na sua composição e o termo HTS, é o óleo com maior concentração de enxofre.

TABELA 3 – COMPARATIVO DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS ÓLEO 2A

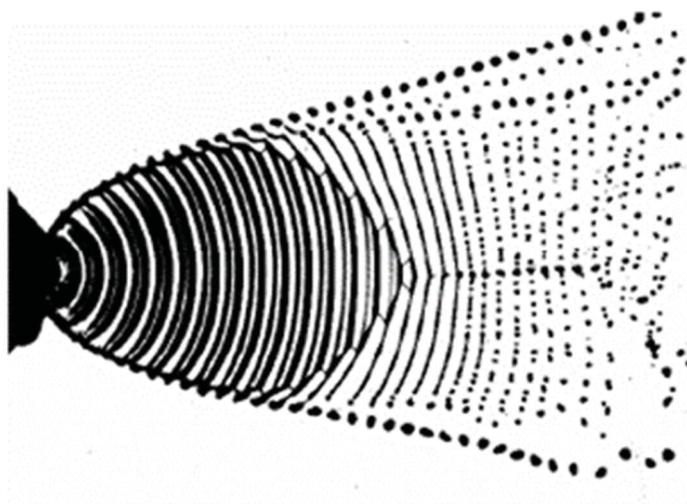
Elemento Químico	Óleo TBTS	Óleo Normal	Óleo HTS
C, %	85 – 88	85 – 88	85 – 88
H, %	9 – 10	7 – 9	6 – 8
N, %	1 – 2	1 – 2	1 – 2
S, %	< 0,5	0,5 – 2,5	>2,5
PCI, Kcal/kg	10.000	9.500	9.000

FONTE: FARENZENA (1995)

A queima de óleos pesados é complicada pela cinética de reações e está relacionado às dimensões de suas partículas. Para combustão de líquidos em geral, é necessário reduzir os tamanhos das gotas, portanto gerar um “spray” é o ponto chave da operação. O aumento da área de contato entre o combustível e o comburente favorece a queima. (IPT, 2010)

A FIGURA 18 mostra as etapas no qual o combustível líquido passa por uma inicial nebulização, mistura de combustível e ar comprimido, uma posterior quebra de ligações superficiais dos líquidos em função da energia cinética do sistema e finalizando com a redução da área de contato em micro gotículas que serão queimadas e gerarão a energia necessária para processo.

FIGURA 18 – FORMAÇÃO DE SPRAY EM COMBUSTÃO DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS



FONTE: IPT (2010)

As principais propriedades dos combustíveis líquidos são:

- **Ponto de fulgor:** Conhecido também como *FLASH POINT*, é a menor temperatura no qual há liberação de gases ou vapores suficientes para que em contato com o oxigênio do ar atmosférico, forma-se uma mistura que exposta a uma fonte de ignição se inflame.
- **Ponto de ignição:** Temperatura no qual o combustível queima não necessitando de uma fonte de energia para sustentar a chama.

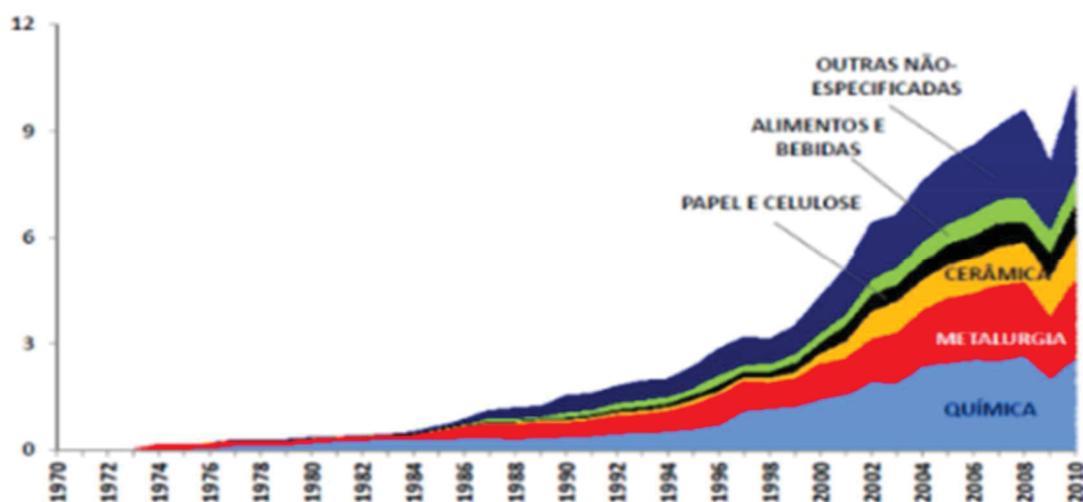
- **Ponto de fluidez:** Temperatura mínima no qual o combustível líquido se torne fluido.
- **Viscosidade:** importante propriedade para determinar as tecnologias a serem utilizadas, como local de armazenamento com agitadores e aquecedores, sistema de bombeamento, atomização em queimadores etc. (DYANMIS 2021)

2.3.1.2 Combustíveis gasosos

Os combustíveis gasosos têm aumentado sua aplicabilidade devido a necessidade por encontrar fontes mais limpas e eficientes de energia, além de reaproveitando de gases oriundos de processos industriais que apresentam características de combustível, como é o caso do GAF (gases de alto forno) utilizados na siderurgia. A limitação do crescimento está na disponibilidade e distância de centros consumidores maiores.

O gás natural, é o maior exemplo de combustível gasoso utilizado em fábricas de cimento, porém são poucas as fábricas que utilizam este combustível. No Brasil, os setores industriais, em ordem crescente, que utilizam o GN são: indústria química, metalúrgica, cerâmica, papel e celulose, alimentos. A indústria de cimento, ainda está longe no consumo deste tipo de combustível, que poderá ser uma oportunidade a médio e longo prazo. A FIGURA 19, mostra os maiores setores consumidores. (BEN 2012; Negreiros 2013)

FIGURA 19 – MAIORES CONSUMIDORES DE GN POR SETOR INDUSTRIAL



FONTE: Negreiros 2013, Balanço Energético Nacional – BEN 2012

A dificuldade na disseminação da utilização do gás natural, está exatamente no transporte deste combustível até a fonte consumidora. São necessários grandes investimentos em infraestrutura já que são transportadores através de gasodutos.

2.3.1.3 Combustíveis sólidos

Os combustíveis sólidos correspondem a quase totalidade de utilização da matriz de combustíveis na indústria de cimento. Os combustíveis fósseis, carvão mineral e coque de petróleo são a base do consumo industrial.

O carvão mineral brasileiro encontra-se fortemente na região de Santa Catarina, e tem papel fundamental na produção de energia elétrica sendo o principal combustível das termoeletricas. O carvão mineral brasileiro apresenta uma boa característica devido ao baixo percentual de enxofre (S) na sua composição, além disso, o poder calorífico tem valores importantes para geração da energia necessária para o processo produtivo. (BIZZO, 2003)

O coque de petróleo produzido no Brasil e no exterior, tem características mais nobres como combustível que o carvão mineral. O alto poder calorífico, a baixa umidade e teor de cinzas, são mais interessantes para um processo produtivo estável.

Ultimamente, devido à elevação do preço do coque no mercado nacional e internacional, a demanda por carvão mineral tem aumentado. O carvão mineral está

cerca de 70% mais barato que o coque de petróleo. Uma boa oportunidade para redução de custos industriais. (FAGUNDES, 2021)

A TABELA 4, mostra as propriedades físico-químicas comparativas entre o carvão mineral e o coque de petróleo.

TABELA 4 – COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS ENTRE COQUE DE PETRÓLEO E CARVÃO MINERAL

Propriedades	Coque Petróleo	Carvão
C, %	88,1	45,3
H, %	3,8	1,5
S, %	6,5	1,6
Voláteis, %	12,3	29,1
Cinzas, %	1,3	17,3
PCI, kcal/kg	8.050	4.750

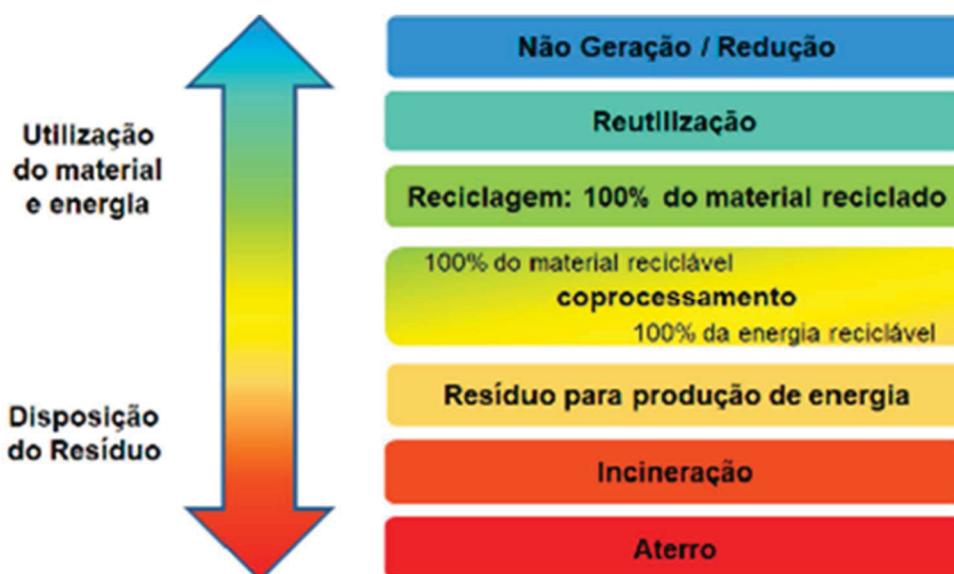
FONTE: FAGUNDES (2021)

2.3.1.4 Combustíveis alternativos

A tecnologia de coprocessamento de resíduos tem sido uma alternativa economicamente viável e ambientalmente interessante no qual as indústrias de cimento têm utilizado para reduzir o consumo de combustíveis fósseis e consequente redução de custos variáveis de produção, já que o combustível fóssil representa praticamente cinquenta por cento (50%) do custo variável na produção do clínquer. O coprocessamento apresenta um apelo ambiental já que se trata de aproveitamento de materiais que seriam destinados para aterros e que devidamente preparados tornam-se combustíveis alternativos. O consumo de combustíveis alternativos é altamente empregado na Europa, Estados Unidos e Japão há mais de 40 anos e no Brasil cerca de 30 anos, (ABCP, 2019).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, 12.305/2010 no seu Art. 9º relata a gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos e cita a ordem de prioridade que são: não geração dos resíduos, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, conforme ilustra a FIGURA 20. O §1º cita a recuperação energética dos resíduos sólidos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental com implementação de monitoramento de emissões dos gases. (PNRS, 2010).

FIGURA 20 – HIERARQUIA DE SOLUÇÕES PARA RESÍDUOS



FONTE: Pries (2018)

A PNRS comenta que o combustível alternativo deverá ser viável tecnicamente para geração de energia, ou seja, deverá ter PCI suficiente para um processo de combustão. A TABELA 5 mostra a comparação entre poderes caloríficos dos combustíveis fósseis usualmente utilizados e alguns combustíveis alternativos.

TABELA 5 – COMPARATIVO PODER CALORÍFICO INFERIOR DOS COMBUSTÍVEIS

Combustível	PCI, kcal/kg
Blend Resíduos triturados (CDR)	4.200
Carvão Mineral	5.200
Carvão Vegetal	4.800
Coque de petróleo	8.160
Lodo ETE úmido	2.650
Madeira	3.580
Óleo Diesel	10.577
Papel	4.785
Plástico	5.306
Solventes	5.861

FONTE: Adaptado de PRIES (2018), Dynamis (2021)

Os resíduos industriais apresentam boa aceitação dos órgãos ambientais, que são os licenciadores da atividade do coprocessamento e das autorizações ambientais

para a queima de um determinado resíduo. Em âmbito nacional, a CONAMA 264/99 é quem regulamenta a atividade. Devidamente autorizados, os combustíveis alternativos são consumidos nas indústrias de cimento. O pneu inteiro ou picado, os resíduos triturados, as lamas e lodos já fazem parte do *blend* de combustíveis e da rotina de controle de insumos e processos na indústria (SNIC, 2021).

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento, o SNIC, a atividade de coprocessamento no Brasil atualmente conta com 57 plantas integradas que possuem fornos rotativos de clínquer, sendo que 38 estão licenciadas para o coprocessamento de resíduos

Os resíduos industriais e urbanos que são oriundos de diversos segmentos, podem compor uma carteira de combustíveis alternativos e serem coprocessados são:

- Solos contaminados com óleo e resíduos petroquímicos;
- Polipropileno, polietileno, PVC, poliéster e acrílico;
- Corante, tintas e vernizes;
- Produtos fotográficos;
- Catalisadores usados;
- Materiais de refino;
- Látex, colas e madeiras contaminadas;
- Embalagens de produtos químicos;
- Lodo de esgoto e ETE;
- Solvente e resíduos oleosos;
- Óleos usados (dos setores automotivos e indústrias de base);
- Graxas, lamas de processos químicos e de destilação;
- Resíduos de empacotamento e de borracha;
- Resíduos de serragem e biomassa;
- Resíduos urbanos preparados como *blend CDRU*

Os fornos de cimentos apresentam condições adequadas para a tecnologia de coprocessamento. Como o processo é integrado no qual apresenta um reator rotativo com temperaturas de chama na ordem de 1800°C, grandes volumes de gases que aumentam a troca de calor no interior do forno e pré-calcinação, bom tempo de residência do material a ser queimador são variáveis de processos que garantem que os combustíveis alternativos sejam queimados respeitando a legislação ambiental

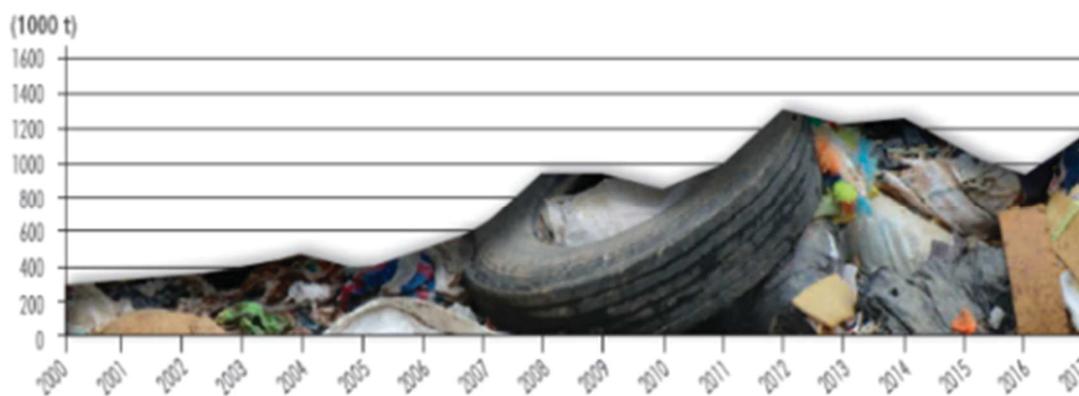
vigente de cada estado. O coprocessamento não altera a qualidade do cimento produzido. (KIHARA, 2014; PRIES, 2018)

Dentre outras vantagens do coprocessamento pode-se destacar: destruição total dos resíduos, emissões atmosféricas totalmente controladas, redução de passivos ambientais, ganho em desenvolvimento de tecnologia para as indústrias e economia de recursos naturais não renováveis. (CETRIC, 2021)

O constante aumento dos custos de aquisição e transporte relacionados à matriz de combustíveis fósseis, faz com que as indústrias de cimento reforcem cada vez mais a procura pelo consumo dos materiais alternativos e o acréscimo da taxa de substituição de calor através do coprocessamento de resíduos sólidos, líquidos ou pastosos torna-se de grande importância para obter ganhos na redução do custo variável de produção e por consequência aumento de EBITDA das empresas.

A FIGURA 21, reportada na revista Panorama Coprocessamento 2019 da Associação Brasileira de Cimento Portland, a ABCP, demonstra a evolução do consumo em toneladas de resíduos coprocessados. Em 2017, mais 1.200.000 toneladas de resíduos foram queimados e tiveram sua destinação final em fornos de clínquer. A mesma FIGURA 21, apresenta uma lateralidade de consumo a partir de 2014 até 2017, porém acredita-se que com aquecimento da economia, a tendência seja que o Brasil possa seguir a tendência mundial no que tange a substituição térmica dos combustíveis fósseis.

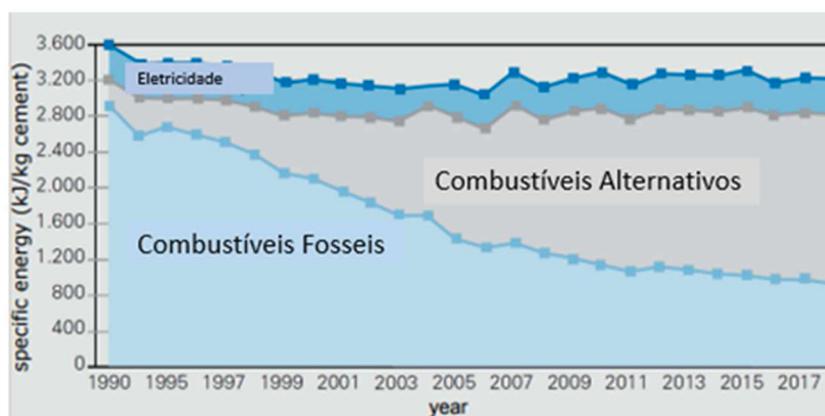
FIGURA 21 – EVOLUÇÃO NO CONSUMO DE RESÍDUOS COPROCESSADOS EM FORNOS DE CLÍNQUER (200 A 2017)



. FONTE: ABCP (2019)

A FIGURA 22, exemplifica a tendencia de substituição dos combustíveis fósseis em função do aumento dos combustíveis alternativos na produção de clínquer. O país citado é a Alemanha, que tem se tornado uma referência em utilização de resíduos em suas fábricas.

FIGURA 22 – COMPARATIVO CONSUMO DE ENERGIA NA PRODUÇÃO DE CLÍNQUER



FONTE: VDZ (2012)

O ponto de atenção do coprocessamento no Brasil está relacionado a qualidade do material *blend CDR ou CDRU*, pastosos e líquidos que são enviados, destinados às cimenteiras. A características destes materiais ainda são entrave para aumentar as taxas de substituição e manter a produção de clínquer nos mesmos patamares de produtividade e estabilidade operacional.

O investimento em boas tecnologias de processamento dos *blends* de CDR tanta nas empresas fornecedoras quanto nas cimenteiras, poderá valorar mais o produto, em termos de R\$/Gcal fornecido, tornando o segmento mais rentável e competitivo em médio a longo prazo. (FAGUNDES, 2021)

2.4 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

A indústria de cimento, é considerada uma indústria de base para o desenvolvimento da sociedade e tem uma relação muito forte com o meio ambiente. Os maiores problemas ambientais de poluição estão associados a poluição sonora e emissões gasosas e de materiais particulados.

2.4.1 Poluição Sonora

A poluição sonora, está vinculada à quantidade de equipamentos necessários para a produção de cimento. Dentre os equipamentos que mais contribuem para o acréscimo da poluição sonora estão os moinhos de bolas, moinhos verticais, trituradores, chutes de transferência de material, correias arrastadoras, dentre outros. As fábricas mais modernas empregam tecnologia que reduz a intensidade de ruídos, medidos em decibéis (dB) e os valores permitidos, são controlados pelos órgãos ambientais através de condicionantes impostas nas autorizações ambientais das fábricas. A FIGURA 23 mostra um exemplo de medição de ruído conforme requisito pelo Instituto de Águas e Terra do Paraná (IAT).

FIGURA 23 – APARELHO PARA MEDIÇÃO DE RUÍDOS (DECIBELÍMETRO)



FONTE: Supremo Secil (2021)

2.4.2 Emissão de material particulado

O material particulado é gerado durante todo o processo de fabricação do cimento. A moagem de farinha ou cru, é um exemplo no qual as matérias primas como calcário, minério de ferro, areia e argila são finamente moídos. O mesmo acontece nas moagens de cimento, no qual clínquer, calcário corretivo e gesso são processados e transformados em cimento. Segundo Yadav (1992), para produzir 1t de cimento, são

necessários o consumo de 2,0 a 2,6 t de matérias primas, gesso e combustíveis. O percentual que fica suspenso como poeira no ar/gás processo é cerca de 5% a 10%. Dado esta condição potencial de emissão de particulado, é fundamental que as fábricas estejam equipadas de filtros para retenção do pó e reaproveitamento no processo. Os filtros de mangas são atualmente a tecnologia mais modernas utilizada no parque industrial cimenteiro no Brasil.

O princípio de funcionamento de um filtro de mangas segundo Perry (2007), consiste na introdução do ar de processo contaminado com material particulado no corpo central do filtro, através de antecâmara lateral devidamente dimensionada no sentido de evitar o choque direto do particulado com as mangas, assim como, reduzir a velocidade do fluxo e precipitar, por efeito de gravidade, o particulado de maior granulometria. O ar, ainda contaminado, é então conduzido para o interior do corpo central e forçado a passar através das mangas de filtragem, local de retenção do particulado ainda em suspensão. Na sequência o ar, já isento de impurezas, passa para o plenum superior, saindo do filtro por meio de bocais localizados em uma de suas laterais.

O processo de limpeza das mangas consiste fundamentalmente na injeção de ar comprimido no interior das mangas, proporcionado por programador lógico, que poderá ser acionado por tempo ou por diferença de pressão no filtro de mangas. Tal programador é projetado no sentido de permitir perfeito comando e controle do sistema, inclusive no que concerne à regulagem do tempo de injeção do ar comprimido em cada fila de mangas, assim como, no intervalo de tempo decorrido entre a limpeza de uma fila e as filas subsequentes. O pó ou material particulado é coletado ou transportado por roscas transportadoras para as suas devidas finalidades. (VENTEC, 2010)

A FIGURA 24 mostra um filtro de mangas em funcionamento na saída do circuito de resfriamento de clínquer.

FIGURA 24 – FILTRO DE MANGAS



FONTE: Supremo Secil (2021)

2.4.3 Emissões gasosas

Os combustíveis contêm as substâncias de relevante potencial poluidor. Algumas delas são liberadas durante o processo de combustão e compõem os gases de saída da chaminé do forno. Com advento do coprocessamento, vale salientar que elementos não voláteis são capturados na estrutura cristalina do clínquer e como a combustão nas fábricas de cimento são bem controladas, os compostos orgânicos são destruídos em quase toda sua totalidade.

Os poluentes gasosos mais tradicionalmente encontrados na indústria de cimento são os compostos monóxido de carbono (**CO**), sulfeto de hidrogênio (**H₂S**), dióxido de enxofre (**SO₂**) e os óxidos de nitrogênio (**NO_x**). Segundo Yadav (1992), a emissão destes gases comparada a outros ramos industriais, é considerado insignificante.

O **CO₂**, dióxido de carbono, é produzido durante a combustão do carbono que faz parte da composição do combustível além da geração em sua maior parte via descarbonatação do **CaCO₃**, carbonato de cálcio, e em menor expressão o **MgCO₃**, carbonato de magnésio. A necessidade de redução de **CO₂** tem gerado bastante eco nas indústrias que buscam ser mais eficiente e menos dependentes de combustíveis fósseis. No caso do cimento, o acréscimo de combustíveis alternativos, e a redução do percentual de clínquer no cimento, são as principais ações de contribuição na redução deste composto gasoso que afeta grandemente a capacidade do planeta de reter calor e como consequência, o aumento da temperatura do planeta (NASA, 2021).

O **NO_x**, é composto em sua grande maioria de monóxido de nitrogênio (**NO**) e dióxidos de nitrogênio (**NO₂**). Estes compostos são formados por dois mecanismos distintos. O primeiro é o **NO_x** térmico que consiste na formação dos poluentes em função das altas temperaturas de chama. O **N₂** presente no ar de combustão em altas temperaturas reage com **O₂** e gera os compostos do **NO_x**. O segundo mecanismo é a formação de **NO_x** via concentração de nitrogênio elementar nos combustíveis (LOCHER, 1989). Experimentalmente, a utilização de combustíveis alternativos nos queimadores principais e nos calcinadores reduz a geração de **NO_x** devido aos menores poderes caloríficos e a geração de uma menor temperatura de chama no processo.

O **SO_x**, é formado pela adição de enxofre (S) via matéria prima e pela concentração nos combustíveis. A combustão produz o **SO₂** que tem a capacidade de reagir com elementos alcalinos do processo durante a clínquerização, como sódio (Na) e potássio (K). Estas reações ocorrem durante um ciclo que é chamado de volatilização e recirculação dentro do forno de clínquer. Parte do enxofre é removido por sua incorporação no clínquer. Para reduzir a emissão deste poluente, a utilização de combustíveis com menor concentração de enxofre como é o caso dos combustíveis alternativos e alguns tipos de carvão mineral, além de um bom controle de processo são as ações predominantes na indústria de cimento. (MARQUES, 2000)

Na parte das emissões gasosas ainda podemos citar, os metais traço. Os elementos de traço são classificados em não voláteis e voláteis. Os elementos não voláteis ou com baixa volatilidade, como chumbo, cádmio, zinco, estanho etc., não são emitidos durante a combustão e são fortemente integrados na estrutura cristalina do clínquer fazendo parte da sua composição. Os elementos voláteis, especialmente tálio e mercúrio, apresentam baixas concentrações porque sua participação na

composição elementar dos combustíveis é muito baixa. Em casos específicos é necessário alterar o tipo de combustível ou introduzir um by-pass para adequar as emissões destes metais traços conforme recomendados pela legislação (VDZ 2012).

2.5 BALANÇO TÉRMICO

Os balanços material e energético, de modo geral, são a primeira etapa na solução de um problema de engenharia de processo, seja ele simples ou complexo. Se o problema envolver apenas transferência de massa entre as correntes, apenas o balanço material será necessário. Se envolver transferência de calor entre as correntes, ou entre o exterior do equipamento, também é aplicado o balanço de energia (BRASIL, 2004).

2.5.1 Balanço de Massa

O balanço de massa (ou material) se baseia no princípio de conservação da massa, sendo feito através da contabilidade de material que entra e deixa um sistema determinado por uma fronteira, seja ela uma corrente, um equipamento ou processo. A aplicação do mesmo depende do contexto do problema em análise, mas é regido pelo fato de que matéria não pode desaparecer e nem ser criada (ANACLETO, 2021).

Os processos de fabricação na indústria em geral, podem ser esquematizados em diagramas de blocos, pois permitem uma visão global do processo, sendo este o primeiro passo para a resolução de problemas. Os blocos representam as operações físicas ou químicas envolvidas, ligados entre si por setas, simbolizando o fluxo de matéria entre as diferentes operações (BRASIL, 2004; HIMMELBLAU, 2006). Importante definir um volume de controle conforme a FIGURA 25, para a definição dos fluxos de entrada e saída de material.

FIGURA 25 – VOLUME DE CONTROLE PARA BALANÇO DE MASSA



FONTE: Gonçalves (2022)

O balanço de massa poderá ser descrito conforma a equação 5 abaixo:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{e=1}^p \dot{m}_e - \sum_{s=1}^q \dot{m}_s \quad (5)$$

Onde:

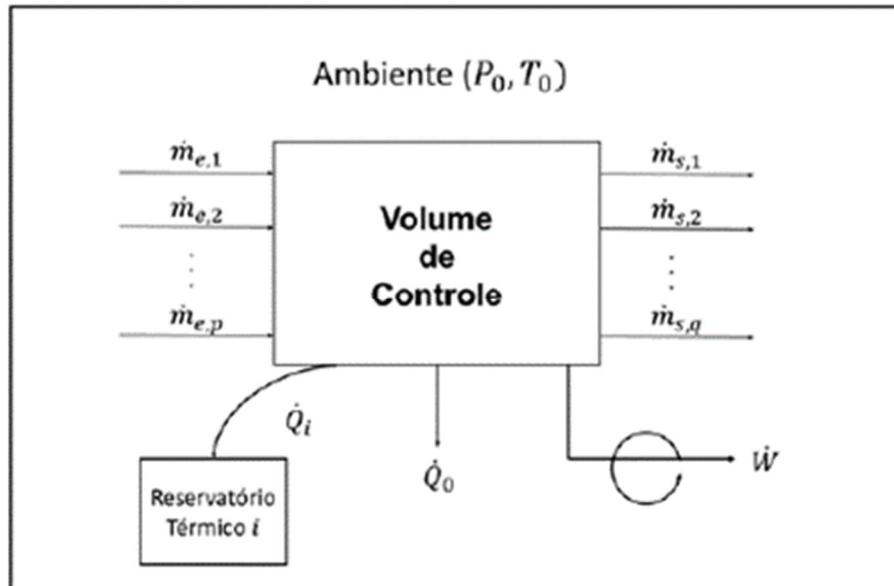
- m_e = massa de entrada no volume de controle que pode ser representada em kg conforme SI;
- m_s = massa de saída no volume de controle que pode ser representada em kg conforme SI;
- t = tempo analisado que poderá ser representado em s conforme SI.

2.5.2 Balanço de Energia

A análise energética de um processo é uma forma de análise bem estabelecida para processos industriais. Baseado na Primeira Lei da Termodinâmica, o princípio de conservação de energia é utilizado para avaliar as transformações e transferências dos diversos tipos de energia presentes na natureza (energia potencial, energia cinética, energia interna, calor e trabalho) em um processo e determinar a quantidade de energia efetivamente utilizada e as perdas do processo (ÇAMDALI; ERIŞEN; ÇELEN, 2004).

Segundo Sandler (2006), para um sistema qualquer, a FIGURA 26, representa um balanço de energia em um determinado volume de controle.

FIGURA 26 – VOLUME DE CONTROLE PARA BALANÇO DE ENERGIA



FONTE: Gonçalves (2022)

Para efeito de simplificação de cálculos, Sandler (2006), considera o processo em regime permanente para o volume de controle a ser estudado. Desta forma a equação 6 é descreve o balanço de energia.

$$0 = \sum_{e=1}^p \dot{m}_e \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_e - \sum_{s=1}^q \dot{m}_s \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_s + \dot{Q}_0 + \sum_{i=1}^N \dot{Q}_i + \dot{W} \quad (6)$$

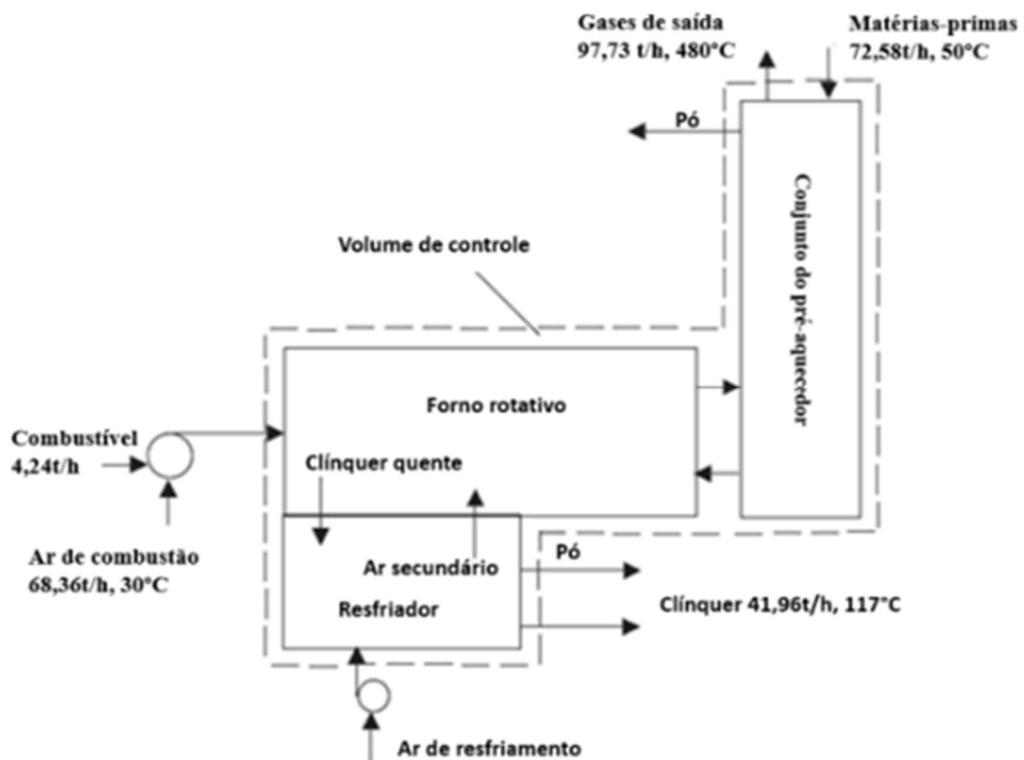
Onde:

- m_e é a massa de entrada em kg;
- v é a velocidade em m/s;
- g é a gravidade em m/s²;
- z é a posição em m;
- m_s é a massa de saída em kg;

- Q_0 é a taxa de transferência de calor do sistema para o ambiente em J/s;
- Q_i é a taxa de transferência de calor do sistema para um Reservatório Térmico i genérico;
- h é a entalpia específica em J/mol;
- W é a taxa de trabalho (potência) em J/s.

O volume de controle na produção de clínquer será baseado no estudo de Kabir et al. (2010), no qual representa uma planta via seca localizada na Nigéria. A FIGURA 25, ilustra o volume de controle do processo a ser analisado considerando o sistema constituído por torre de ciclones, forno de clínquer e resfriador. Vale ressaltar que os dados ilustrados na FIGURA 27 são referentes à planta nigeriana, além de ser um exemplo para esta dissertação.

FIGURA 27 – VOLUME DE CONTROLE DE UM PROCESSO DE CLINQUERIZAÇÃO



FONTE: adaptado de Kabir et al. (2010)

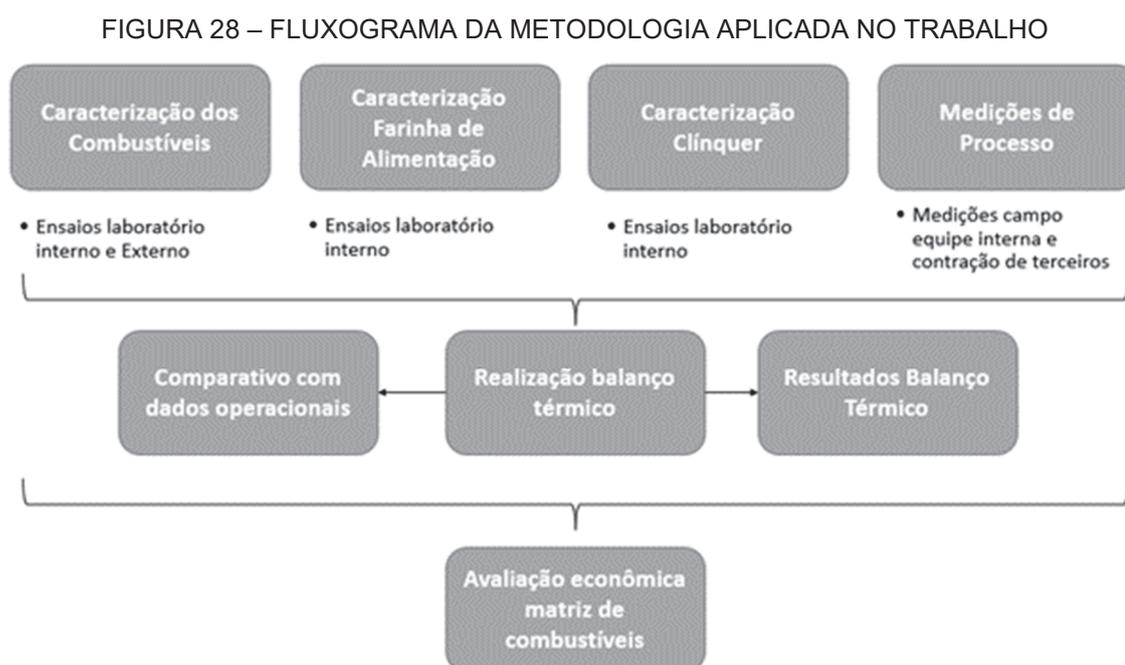
3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desenvolvida para este trabalho, consiste em um estudo de caso, no qual foi feito um método experimental para avaliação de todo o processo de clínquerização por meio de balanço de massa e energia. Além do método experimental, foi realizada uma análise comparativa e quantitativa dos dados operacionais para validar o balanço térmico.

A Supremo foi fundada em 2003 em Pomerode – SC, uma das principais companhias do setor na região Sul do Brasil, a Supremo Secil Cimentos é uma multinacional portuguesa que produz cimento ensacado e a granel, além de prestar serviços especializados de concretagem.

O estudo de caso consiste na avaliação da matriz de combustíveis utilizada atualmente e um comparativo com o realizado no ano de 2020. Hoje, a matriz de combustíveis conta com coque de petróleo, carvão mineral, resíduos triturados e pneus picados. Devido aos aumentos significativos do preço do coque de petróleo, os custos variáveis de produção elevaram-se e a redução do consumo deste combustível é fundamental para garantir competitividade da empresa no mercado.

A FIGURA 28, demonstra a metodologia aplicada para avaliação da matriz de combustíveis e sua caracterização.



FONTE: O autor (2022)

As coletas dos materiais: combustíveis, farinha de cada estágio da torre de ciclones, clínquer foram realizadas entre os dias 20 de setembro de 2021 a 05 de outubro de 2021, mesma data no qual foram feitas as medições de processo para realização do balanço térmico da unidade de Adrianópolis – PR.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS

Os combustíveis foram analisados no laboratório da empresa Supremo Secil e como é o foco deste trabalho, foram também analisados em laboratório externo credenciado, no caso, laboratório de análises da ABCP. Os custos dos ensaios externos foram pagos pela empresa Supremo Secil.

Os combustíveis amostrados e analisados de forma separada foram: coque de petróleo moído, carvão mineral moído, resíduo triturado (RT) e pneu picado.

Importante salientar que operacionalmente, o coque de petróleo e o carvão mineral após passarem pelo processo de moagem, são dosados juntos no queimador principal e no calcinador na proporção de 40% de carvão mineral e 60% de coque de petróleo. Esta proporção é determinada diretamente pelo painel de controle da planta e é definido pelas equipes de engenharia e qualidade em função das demandas do processo e da qualidade química do clínquer a ser produzido. A FIGURA 29, mostra uma amostra da mistura coque/carvão moídos prontos para serem injetados no forno e calcinador. Essa amostragem é feita de forma automática por amostradores com atuadores motorizados nas linhas de combustíveis.

FIGURA 29 – AMOSTRA DA MISTURA COQUE / CARVÃO MOÍDO



FONTE: O autor (2022)

Já os combustíveis alternativos também conhecidos como CAs são misturados antes de entrar no processo na proporção volumétrica de 3 “volumes de concha de pá carregadeira” de RT para 1 “volume de concha de pá carregadeira” para o pneu conforme a FIGURA 30. Importante salientar que esta proporção é definida pelo setor de qualidade da empresa, que avalia o PCI médio e as análises de cinzas que serão incorporadas no processo.

FIGURA 30 – AMOSTRAGEM DA MISTURA 3:1 ENTRE RT E PNEUS



FONTE: Supremo Secil (2021)

A FIGURA 30, destaca um operador coletando amostra da mistura de CA em dez pontos diferentes do lote preparado, na proporção 3:1 entre RT e pneu para consumo no calcinador. Esta mistura é feita todo turno de operação de 8 horas, de forma a ter o melhor controle de entrada deste tipo de combustível no calcinador.

Como a granulometria dos CAs é muito heterogênea, é necessário reduzir seu tamanho para realizar as análises. Para tal ação, é utilizado um equipamento chamado de triturador de facas. A FIGURA 31, mostra o resultado da trituração e a amostra de CA pronta para as análises necessárias.

FIGURA 31 – AMOSTRA DO MIX DE CA TRITURADO



FONTE: O autor (2022)

As análises necessárias para controle de processo e qualidade para os combustíveis são:

- Umidade, %
- Cinzas, %
- Voláteis, %
- PCS, kcal/kg / PCI, kcal/kg;
- Cloro (Cl), %
- Enxofre (S), %

3.1.1 Determinação de Umidade

A determinação de umidade dos combustíveis, é realizada conforme a instrução técnica **03 IT C 10 0014** da empresa Supremo Secil (2022).

Os materiais e equipamentos necessários para esta análise são:

- Balança de precisão de 0,1g;
- Balança de umidade infravermelho IV;
- Espátula para pesagem;
- Bandeja de alumínio;
- Estufa;
- Dessecador;
- Placa de Petri.

A quantidade mínima para secagem é de 50g, e deve permanecer na temperatura de 105 ± 5 °C até a massa ficar constante. Para determinação do percentual de umidade (U), deve-se seguir a equação 7:

$$U = \frac{(M1+M2)-MF \times 100}{M2} \quad (7)$$

Onde:

- U = Umidade, %
- M1 = massa bandeja alumínio;
- M2 = massa da amostra bruta úmida;
- MF = massa amostra seca (última pesagem em massa constante).

3.1.2 Determinação de carbono fixo, voláteis e cinzas

A determinação de cinzas, voláteis e carbono fixo, são realizadas conforme a instrução técnica **03 IT C 10 0024** da empresa Supremo Secil (2002) que é baseada nas normas ABNT NBR 8289 e ABNT NBR 9092, nos quais regulamenta a determinação do teor de cinzas para carvão mineral e coque de petróleo respectivamente.

Os materiais e equipamentos necessários para esta análise são:

- Analisador termogravimétrico TA 5500 (TGA);
- Espátula de pesagem;
- Cadinho de porcelana com tampa própria TGA;
- Pinça metálica;
- Balança de precisão de 0,0001g;
- Cadinho de porcelana;
- Forno Mufla;
- Placa refratária;
- Dessecador.

No caso do laboratório da Supremo, as análises feitas pelo TGA são gerenciadas pelo *software* de controle denominado *FLOW*, sendo que os resultados

serão exibidos na tela *GRAPH* do referido programa e os dados exportados para os *softwares* de controle da fábrica.

3.1.3 Determinação do poder calorífico dos combustíveis

A determinação do poder calorífico dos combustíveis é realizada conforme a instrução técnica **03 IT C 10 0048** da empresa Supremo Secil (2022).

Os materiais e equipamentos necessários para esta análise são:

- Balança com precisão de 0,0001g;
- Balança para determinação de umidade;
- Espátula para pesagem;
- Cadinho de quartzo ou níquel cromo;
- Béquer de 400ml;
- Pipeta;
- Bureta;
- Suporte Universal;
- Estufa
- Dessecador;
- Calorímetro IKA C5003/C5001 (FIGURA 32)
- Bomba calorimétrica (sempre limpa e seca);
- Fio de algodão;
- Água destilada.

FIGURA 32 – CALORÍMETRO IKA C5003/5001

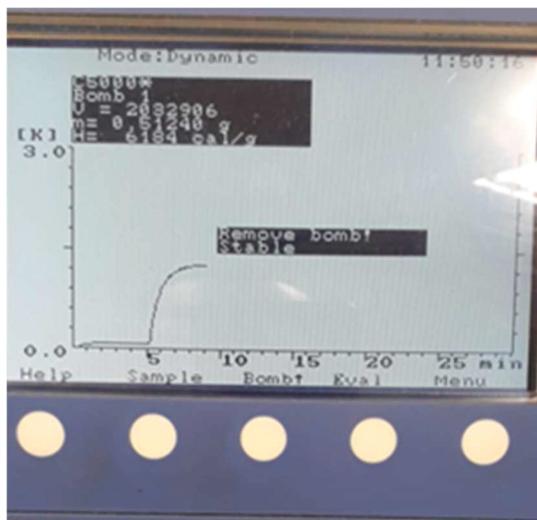


FONTE: Supremo Secil 2022

As amostras preparadas deverão ser secas conforme o item 3.1.1 DETERMINAÇÃO DE UMIDADE. Após a procedimento de secagem, as amostras deverão resfriar até a temperatura ambiente dentro do dessecador. É necessário pesar entre 0,5 à 1,0 gramas do combustível para realização do ensaio.

Para iniciar as análises, é preciso encaixar a bomba calorimétrica na célula de combustão do calorímetro IKA. Assim que estiver tudo pronto, o calorímetro entra em modo de operação, permitindo o início do processo através da mensagem *START*. O processo inicia com a queima da amostra e um gráfico de acompanhamento é mostrado no visor. Quando o processo finaliza, a bomba calorimétrica tem um alívio de pressão e desliga. A FIGURA 33, mostra o resultado de PCS, poder calorífico superior, aparece no visor do IKA C5003/C5001 na unidade de cal/g, que é equivalente a kcal/kg.

FIGURA 33 – RESULTADO DE PCS NO GRÁFICO DA BOMBA CALORIMÉTRICA



FONTE: O Autor

Para transformar o PCS em PCI, poder calorífico inferior, é necessário utilizar a equação 8 segundo Costa et al. (2009).

$$PCI = PCS - 2440 * (9H + U) \quad (8)$$

Onde:

- PCI = Poder Calorífico Inferior, kJ/kg;
- PCS = Poder Calorífico Superior, kJ/kg;
- H = concentração de hidrogênio no combustível, kg/kg;
- U = umidade do combustível, kg água/kg.

Para transformar o resultado de kJ/kg para kcal/kg, unidade usual na indústria cimenteira, basta somente dividir por 4,184 (TABELA SI).

O valor do teor de hidrogênio, é considerado uma constante pela empresa Supremo Secil, no qual atualiza a análise elementar dos combustíveis a cada 06 meses para resíduos triturados e anual para coque de petróleo, carvão mineral e pneu. Os valores considerados neste trabalho estão representados na TABELA 6, ilustrada a seguir.

TABELA 6 – COMPARATIVO ENTRE %H E UMIDADE TÍPICA DA MATRIZ DE COMBUSTÍVEIS

Combustível	% H	% Umidade
Blend Resíduos triturados (CDR)	3,0	25,0
Carvão Mineral	1,5	15,0
Coque de petróleo	3,8	5,0
Pneus	6,5	0,8

FONTE: O autor (2022)

3.1.4 Determinação do teor de cloro dos combustíveis

A necessidade de controlar a concentração de cloro nos combustíveis, foi necessária em função do aumento do percentual de substituição de combustíveis alternativos no processo de clínquerização. O combustível que apresenta concentrações de cloro consideráveis, é o RT. O cloro em determinadas concentrações no processo, este percentual varia de forno para forno, pode causar entupimentos na torre de pré-calcinação. A partir, deste grave problema, faz-se necessário o controle diário da entrada de cloro no processo.

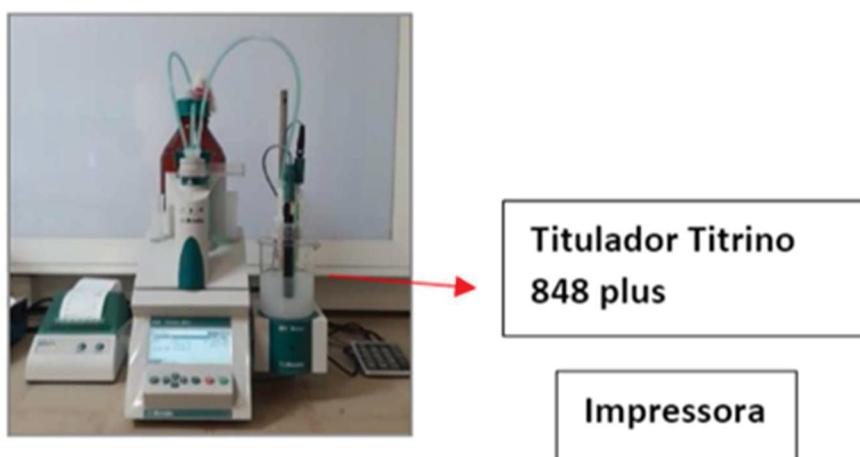
A determinação de cloretos é realizada conforme a instrução técnica **03 IT C 10 0057** da empresa Supremo Secil (2002) que é baseada na norma ABNT NBR 14832, nos qual regulamenta a determinação do teor de cloretos por método de íon seletivo.

Os materiais e equipamentos necessários para esta análise são:

- Balança com precisão de 0,0001g;
- Espátula para pesagem;
- Balões volumétricos de 500 e 1000ml;
- Béquer de 250ml;
- Dessecador;
- Tubo de ensaio;
- Estufa;
- Titulador Titrino 848 PLUS METROHM com íon seletivo para cloretos (FIGURA 34);
- Agitador Magnético;
- Vidro de Relógio;
- Bastão Magnético;
- Papel indicador universal;

- Frasco reagente âmbar e translúcido;
- Água destilada;
- Nitrato de Prata (AgNO_3 0,01mol/l);
- Cloreto de Sódio (NaCl 0,01mol/l);
- Realizar preparação das soluções em laboratório com bancada e capela.

FIGURA 34 – DETERMINAÇÃO DE CLORO VIA TITRINO 848 PLUS



FONTE: O Autor

De forma simplificada, para realizar a análise pelo equipamento TITRINO 848 PLUS, é necessário pesar ($10,0000 \pm 0,0010$) g da amostra a ser analisada. Adicionar 5ml da solução de cloreto de sódio (NaCl 0,01mol/l). É necessário introduzi na solução o eletrodo de referência de AgCl . A solução padrão da titulação será o nitrato de prata (AgNO_3 0,01mol/l). Feitas as soluções e adicionadas ao equipamento conforme a FIGURA 34, o ponto de equivalência é calculado pelo consumo do titulante de concentração conhecido, portanto o nitrato de prata reage com os cloretos formando um precipitado de cloreto de prata, quando a titulação atinge o ponto de neutralização obtêm-se o ponto final da titulação, assim determinando o percentual de Cloro na amostra analisada conforme a FIGURA 35.

FIGURA 35 – RESULTADO % VIA TITRINO 848 PLIS



FONTE: O Autor

3.1.5 Determinação do teor de enxofre dos combustíveis

A determinação do teor de enxofre dos combustíveis é realizada conforme a instrução técnica **03 IT C 10 48** da empresa Supremo Secil (2022).

Os materiais e equipamentos necessários para esta análise são:

- Balança com precisão de 0,0001g;
- Balança para determinação de umidade;
- Espátula para pesagem;
- Cadinho de quartzo ou níquel cromo;
- Estufa
- Dessecador;
- LECO S844 (FIGURA 36)

As amostras preparadas deverão ser secas conforme o item 3.1.1 DETERMINAÇÃO DE UMIDADE. Após a procedimento de secagem, as amostras deverão resfriar até a temperatura ambiente dentro do dessecador. É necessário pesar 1,0 gramas do combustível para realização do ensaio. Esta amostra sofre uma combustão em um fluxo de oxigênio purificado após sofrer uma indução elétrica para seu aquecimento. O carbono e o enxofre presentes na amostra são oxidados a dióxidos de carbono CO_2 e em dióxido de enxofre SO_2 . Estes gases são removidos e

são encaminhados a uma câmara com células de infravermelho, onde seus respectivos comprimentos de ondas são transformados via software do programa em concentração. A FIGURA 36, mostra o equipamento analisador de combustão LECO.

FIGURA 36 – EQUIPAMENTO LECO PARA DETERMINAÇÃO DO % S



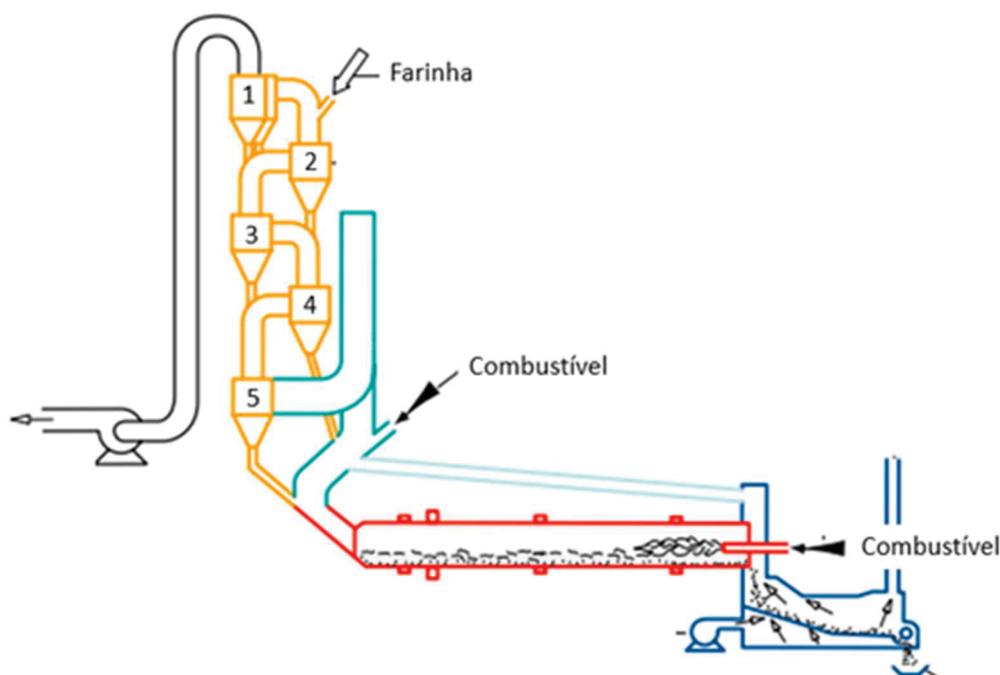
FONTE: O Autor

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA FARINHA

Para caracterizar a farinha, foi necessário coletar amostras nos cinco estágios da torre de ciclones conforme mostra o fluxograma esquemático da FIGURA 37. Em cada uma das etapas foi analisado os principais óxidos, os módulos químicos conforme descrito nas equações de 1 a 3: FSC (Fator de Saturação em Calcio), MA (Módulo de alumínio) e MS (Módulo de sílica) e a perda ao fogo.

A coleta de farinha em cada estágio requer uma atenção especial com a segurança da atividade. A torre de ciclones é considerada um dos equipamentos estacionários mais perigosos e um vazamento de farinha quente pode causar ferimentos e queimaduras graves aos trabalhadores. Importante fazer a coleta com equipamento de proteção individual adequado à atividade.

FIGURA 37 – PONTOS DE AMOSTRAGEM NA TORRE DE CICLONES



FONTE: Adaptado VDZ (2012)

3.2.1 Determinação da análise de óxidos da farinha

A farinha dos 05 estágios da torre foram coletadas e as amostras enviadas ao laboratório da Supremo Secil. É importante ressaltar que o primeiro estágio ou ciclone 1 é a farinha mais “crua”, ou seja, sem sofrer o processo de descarbonatação e a farinha do quinto estágio ou ciclone 5 é a farinha de alimentação no forno. Neste quinto estágio, a farinha está praticamente descarbonatada. Amostras de farinha do quinto estágio foram enviadas ao laboratório credenciado da ABCP para comparação dos resultados.

Para determinar os principais óxidos, é necessário que as amostras sejam transformadas em pastilhas para posterior leitura em equipamento de raio X.

As pastilhas são confeccionadas em um equipamento chamado CENTAURUS da empresa FLSmidth. A FIGURA 38 ilustra o equipamento que é uma unidade compactada de moagem e prensa que transformar as amostras granel em pastilhas rígidas para leitura em equipamentos de fluorescência e difratometria (FLSMIDTH 2022).

FIGURA 38 – CENTAURUS FLSMIDTH



FONTE: FLSmith (2022)

As pastilhas são direcionadas para o equipamento de espectrometria de fluorescência de raio X S8 TIGER da empresa Bruker. A metodologia de análise química por raio X (XRF) é normatizada pela NBR 14656. A FIGURA 39 mostra o equipamento instalado e em funcionamento na empresa Supremo Secil. O S8 TIGER é um espectrômetro que utiliza que alta tecnologia para determinar elementos químicos de berílio a uranio (BRUKER 2022). No estudo de caso, os elementos analisados serão: Ca, Si, Al, Fe, Mg, S, K, Na.

FIGURA 39 – ESPECTRÔMETRO E DIFRATÔMETRO BRUKER



FONTE: Bruker (2022)

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO CLÍNQUER

Para caracterizar o clínquer, foram coletadas amostras na saída do resfriador e no equipamento de transporte de clínquer para o silo de estocagem. Os dois pontos de amostragem são próximos, porém o segundo é para certificar a ausência de colagens durante o processo de coleta das amostras. Em ambos os casos, o clínquer analisado tem o intuito de obter-se os principais óxidos e módulos químicos conforme descrito nas equações de 1 a 3: FSC (Fator de Saturação em Calcio), MA (Módulo de alumínio) e MS (Módulo de sílica). Além dos óxidos e módulos químicos, é necessário e fundamental em termos de análise de qualidade, as análises dos minerais do clínquer: C3S, C2S, C3A e C4AF. A FIGURA 40, exemplifica uma amostra de clínquer.

FIGURA 40 – CLÍNQUER NO CIRCUITO DE TRANSPORTE PARA O SILO



FONTE: O autor (2022)

3.3.1 Determinação das análises de óxidos e minerais do clínquer

O procedimento para determinação dos principais óxidos é o mesmo utilizado na farinha com a utilização do XRF descrito no subitem 3.2.1.

Para obtenção dos teores de minerais do clínquer, as pastilhas de clínquer confeccionadas no CENTAURUS, são direcionadas para o equipamento de difratometria D4 ENDEAVOR TIGER da empresa Bruker ilustrado na FIGURA 39, ao lado do XRF. A metodologia de análise é simplificada para as siglas XRD. Não existe uma norma que determina as análises de difratometria para o clínquer e a maioria das empresas no Brasil não contemplam deste equipamento em seus ativos. Para determinação dos teores de C3S, C2S, C3A e C4AF, eles utilizam fórmulas empíricas

baseada na análise dos óxidos. Neste estudo de caso, os resultados da difratometria serão utilizados para exprimir o percentual de cada mineral do clínquer.

O D4 ENDEAVOR é um difratômetro que utiliza que alta tecnologia para determinar minerais através de raio X e avaliação de comprimentos de onda (BRUKER 2022). No caso da Supremo Secil, a Bruker foi contratada em 2012 para estabelecer os padrões de análise e os procedimentos de calibração do equipamento. Com os padrões pré-estabelecidos, as análises dos minerais do clínquer foram ajustados e estão em pleno funcionamento até a presente data da realização deste trabalho.

3.4 MEDIÇÕES DE PROCESSO

3.4.1 Determinação do fator farinha clínquer (FFC) – Produtividade do forno

A determinação da produtividade do forno foi feita através de pesagem de caminhões truck pequenos com capacidade de 30t durante 12 horas seguidas em balança rodoviária calibrada. Uma premissa para que a pesagem ocorra é o forno estável nas últimas 48 horas e o sistema de dosagem da farinha de alimentação esteja calibrada.

Nas fábricas de cimento, existem os valores medidos da farinha de alimentação que é dosada por equipamentos dosadores gravimétricos de alta precisão. Para determinar a produção ou produtividade do forno, é utilizado um fator empírico chamado fator farinha clínquer que pode variar de unidade para unidade em função das características químicas da farinha e do combustível. Neste estudo de caso, espera-se que o fator medido esteja entre no intervalo entre 1,65 a 1,70, ou seja, se a alimentação de farinha na torre de ciclones for de 100 t/h, espera-se produzir 60,6 t/h ou 58,8 t/h de clínquer respectivamente. A equação 9 explicita o cálculo para determinação do fator farinha clínquer (FFC).

$$FFC = \frac{\textit{Alimentação Farinha dosada}}{\textit{Clínquer medido via balança}} \quad (9)$$

3.4.2 Medições de vazão, temperatura e pressão

Para as medições de vazão, pressão e temperatura do processo, foram utilizados os seguintes instrumentos e acessórios:

- Analisador de gases TESTO 350 com células de O₂, NO_x, CO, CO₂, SO₂;
- Câmera termográfica portátil FLIR TG275 0 – 650°C;
- Sondas de temperatura flexível ECIL de 0 – 1200°C;
- Anemômetro digital KIMO;
- Tubo pitot L de 1500mm com termopar integrado KIMO;
- Tubo de pitot S de 2000mm com termopar integrado KIMO;
- Módulo multifuncional de leitura MP 2000 KIMO com mangueiras reforçadas e ponteiros de aço de 500mm;
- Chave de grifo;
- Estopa;
- Luvas de vaqueta cano longo;
- Capacete, óculos de proteção, protetor auricular.

As medições foram realizadas pelo time de engenharia e produção da empresa Supremo Secil e os resultados encontrados serviram de base para o balanço térmico.

A análise dos gases é feita na saída da torre de ciclones para avaliação da eficiência do processo através dos valores de CO e O₂, e na chaminé para verificação de parâmetros ambientais como NO_x e SO₂ conforme mostra a FIGURA 41.

FIGURA 41 – ANÁLISES DE GASES DA CHAMINÉ DO FORNO



FONTE: O autor (2022)

As medições de vazão e temperatura são feitas com os tubos de pitot L e S com termopar integrado e acoplados ao módulo multifuncional da KIMO. O tubo de pitot L é utilizado para medições em correntes de gases limpos sem a presença de pó como é o caso dos ventiladores do resfriador de clínquer. O tubo de pitot em S, entretanto, é um instrumento essencial para medições em correntes gasosas com presença de particulado. É utilizado, na saída da torre de ciclones, ar terciário, saída do ar de excesso do resfriador. A FIGURA 42, mostra a diferença entre ambos os instrumentos.

FIGURA 42 – TUBOS DE PITOT L E S



FONTE: KIMO (2022)

As vazões dos ventiladores do resfriador de clínquer também poderão ser medidas com a utilização do anemômetro portátil. Porém, as medições deverão ser feitas na admissão dos ventiladores do resfriador de clínquer.

O anemômetro também deverá ser utilizado para medir a vazão dos ventiladores do casco do forno para determinar os índices de convecção e posterior cálculo de perdas térmicas pela parede.

A câmera termográfica, será utilizada em todos os equipamentos da torre de ciclones, calcinador e resfriador para medir as temperaturas externas dos equipamentos. Estas temperaturas farão parte do cálculo de perdas térmicas.

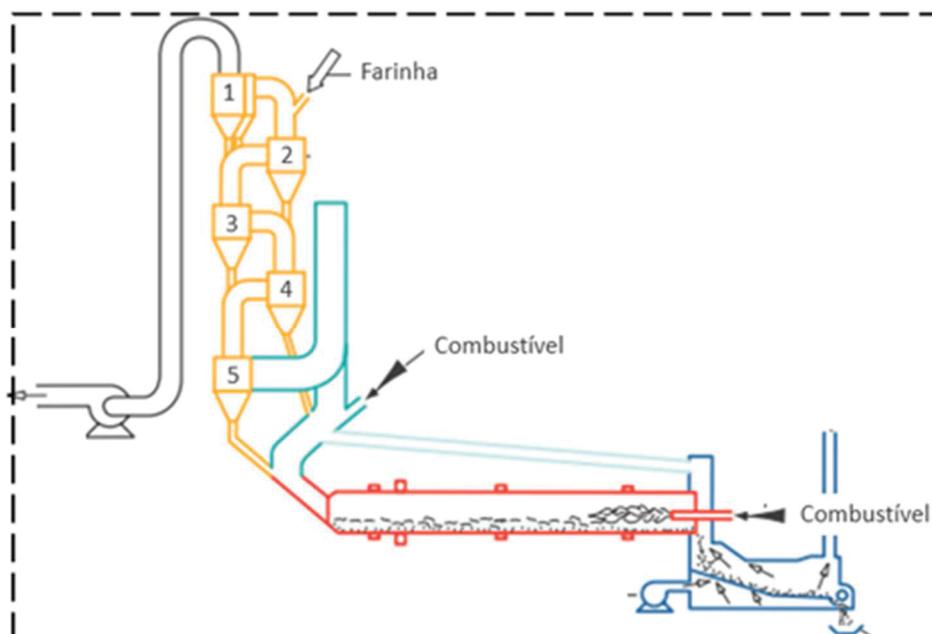
3.4.3 Balanço térmico

Realizada todas as caracterizações e medições de processo, os dados obtidos servem para confeccionar o balanço térmico que fornecerá informações importantes, como o consumo térmico do forno, ou seja, a energia específica relacionada aos combustíveis para produzir clínquer, e sua posterior otimização.

Os volumes de controle propostos são:

- VC1 = Torre – Forno – Resfriador (completo, FIGURA 43)
- VC2 = Resfriador (análise eficiência, FIGURA 44)

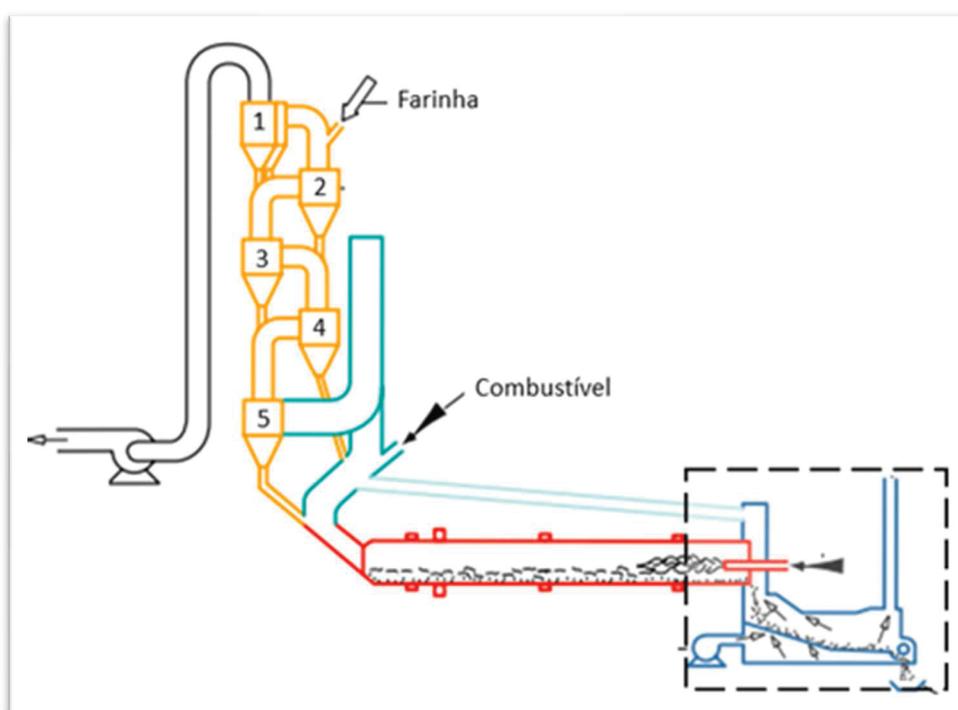
FIGURA 43 – VC1 - VOLUME CONTROLE COMPLETO



FONTE: Adaptado VDZ (2012)

A FIGURA 43, representa o volume de controle completo, desde a entrada de farinha na torre até a saída dos gases na chaminé do forno, o ar de excesso do resfriador e clínquer para a estocagem. A FIGURA 44, mostra somente o balanço do resfriador. Este balanço separado é feito para determinar o aproveitamento energético do calor recuperado pelo clínquer que comporão os ares de combustão do processo, além da eficiência de resfriamento do clínquer. Para este trabalho, ambos serão realizados, porém o VC1 é o mais importante devido às análises que serão feita no consumo de combustíveis da unidade fabril.

FIGURA 44 – VC2 – VOLUME DE CONTROLE BALANÇO DO RESFRIADOR



FONTE: Adaptado VDZ (2012)

Para apresentar o resultado do balanço térmico, será elaborado um resumo conforme a TABELA 7 apresentada a seguir. O memorial de cálculo de todo balanço térmico é pertencente à empresa Supremo Secil e não poderá ser divulgado neste estudo de caso.

TABELA 7 – EXEMPLO RESUMO BALANÇO TÉRMICO

Entradas	kJ/kg clínquer	Kcal/kg clínquer	% Energia
Combustíveis	Z	Y	X
Farinha alimentada	Z	Y	X
Ar do queimador	Z	Y	X
Ar do resfriador	Z	Y	X

Saídas	kJ/kg clínquer	Kcal/kg clínquer	% Energia
Calor de formação do clínquer	Z	Y	X
Evaporação água	Z	Y	X
Gases saída torre	Z	Y	X
Ar excesso Resfriador	Z	Y	X
Clínquer	Z	Y	X
Perdas térmicas processo	Z	Y	X
Fechamento / Erro	Z	Y	X

FONTE: O autor (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em setembro e outubro de 2021, foi realizado o balanço térmico do forno da Supremo Secil em Adrianópolis. Os dados obtidos das medições de processo e caracterização dos insumos e matérias primas, irão compor os resultados deste trabalho.

Para enriquecer o trabalho, foi feita uma validação operacional utilizando dados reais de produção nos meses de março a julho de 2022 com o intuito de confirmação o balanço térmico realizado no ano anterior, além de construir correlações entre qualidade dos combustíveis alternativos e a redução do coque de petróleo.

É importante salientar que alguns dados por motivos de sigilo empresarial, não serão apresentados.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E ALTERNATIVOS

Foram coletadas e analisadas as amostras dos combustíveis fósseis bruto: carvão mineral e coque de petróleo separadamente, além do combustível fóssil moído no moinho vertical para o queimador do forno e para o calcinador. É importante informar que o combustível moído para o queimador principal é coque de petróleo puro e para o calcinador é feito uma mistura de 50% em massa de ambos os combustíveis.

Foram coletadas e analisadas as amostras de pneu puro e do mix de combustíveis alternativos sendo esta mistura composto por 3 volumes de resíduos triturados, conhecidos como RT e 1 volume de pneu picado. O objetivo de fazer o pneu separado foi para a empresa ter dados mais apurados para controle de processo diário já que não tem os equipamentos para caracterização adequada de pneus picados. A TABELA 8 apresenta os resultados do laboratório da ABCP das amostras enviadas pela Supremo Secil. Os ID das amostras apresentados nesta tabela são as identificações feitas pelo laboratório da ABCP.

TABELA 8 – RESULTADOS DAS ANÁLISES DOS COMBUSTÍVEIS

Composição Química	Carvão Mineral Bruto	Coque Petróleo Bruto	Comb. Moído Queimador 100% coque	Comb. Moído Calcinado or 50% coque + 50% carvão	MIX RT + Pneus	Pneus Picados
Enxofre (S), %	0,62	5,86	5,57	3,90	0,22	1,26
Carbono (C), %	55,10	86,20	80,60	66,10	46,45	75,91
Hidrogênio (H), %	3,45	3,76	3,63	3,34	6,63	8,62
Nitrogênio (N), %	0,82	1,85	1,72	1,20	0,66	4,84
Umidade (U), %	12,87	1,29	0,89	3,11	29,09	1,47
Voláteis (MV), %	32,27	14,39	18,11	27,84	79,76	84,87
Carbono Fixo (CF), %	37,76	84,37	74,62	49,24	1,89	11,97
Cinzas (Z), %	29,98	1,18	7,31	23,71	18,33	3,12
PCS, kcal/kg	5.231	8.354	7.891	6.269	5.323	5.921
PCI, kcal/kg	5.056	8.163	7.707	6.100	4.987	5.584
PCI, kJ/kg	21.154	34.153	32.246	25.522	20.865	23.363
ID Amostra ABCP	243476	243477	243478	243479	243482	243484

FONTE: O autor (2022)

Para cálculos de energia de combustão em balanços térmicos, é fundamental ter as análises elementares dos combustíveis moídos, uma vez que, são os consumidos no processo. Pela TABELA 8, é importante identificar que o poder calorífico do coque de petróleo bruto é cerca de 8.163 kcal/kg e, o coque moído para o queimador, apresenta um PCI de 7.707 kcal/kg. O que explica esta diferença de valores entre o coque bruto e o coque moído, é o incremento de pó farinha do processo na moagem de coque. O forno fornece gases quentes para a moagem de combustível e as partículas finas de farinha são arrastadas e se incorporam no combustível. O mesmo acontece para qualquer mistura de combustíveis fósseis que são cominuídos no processo de moagem. Os combustíveis alternativos são alimentados no processo de forma bruta, então o efeito da incorporação de pó de farinha não existe.

A incorporação de pó de farinha nos combustíveis fósseis é um item de importância no controle químico de processo. Este pó apresenta teores de MA (módulo de alumínio) e MS (módulo de sílica) significativo que podem alterar a qualidade do clínquer gerando distúrbios de processo como clínquer empoeirado e

entupimentos por descontrole de viscosidade da fase líquida. O controle na formação da farinha que alimentará o forno deverá levar em conta a incorporação do pó na fase moagem de combustíveis.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA FARINHA

A farinha alimentada foi amostrada nos dias 21 e 22 de setembro de 2021 e as amostras foram enviadas para o laboratório externo da ABCP, e foram analisadas no laboratório interno da Supremo. ATABELA 9 apresenta os resultados dos óxidos obtidos por ambos os laboratórios.

TABELA 9 – RESULTADOS DAS ANÁLISES DA FARINHA ALIMENTADA

Composição Química	Farinha 5º Estágio 21/09/2021	Farinha 5º Estágio 22/09/2021	Farinha 5º Estágio 21/09/2021	Farinha 5º Estágio 22/09/2021
	Dados Supremo		Dados ABCP	
Perda ao Fogo, %	36,22	35,92	36,16	35,90
SiO ₂ %	12,20	12,50	11,81	11,90
Al ₂ O ₃ %	2,99	3,14	3,13	3,15
Fe ₂ O ₃ %	1,96	2,09	2,32	2,32
CaO %	41,20	40,90	41,48	41,65
MgO %	3,59	4,03	3,66	3,53
SO ₃ %	0,32	0,34	0,44	0,42
Na ₂ O %	0,12	0,19	0,11	0,12
K ₂ O %	0,69	0,76	0,48	0,48
Cl %	0,009	0,009	0,03	0,04
F %	-	-	-	-
LSF	105,74	102,09	104,23	105,90
MS	2,46	2,39	2,39	2,43
MA	1,53	1,50	1,49	1,47
ID AMOSTRAS	243480	243481	393570	393657

FONTE: O autor / adaptado ABCP (2022)

Os dados mais importantes obtidos da TABELA 9 são os módulos químicos FSC, MA e MS que foram obtidos conforme descreve FARENZENA (1990). Estes

módulos deverão ser analisados em conjunto, porque a partir deles, é possível prever qual a quantidade de óxido de cálcio que o processo terá disponível para formação de C3S, a dureza de queima, ou seja, a dificuldade de realizar a reação de clínquerização, a quantidade de fase líquida disponível e sua viscosidade. É necessário ter um equilíbrio entre os quatro principais óxidos (Ca, Si, Al, Fe) através dos seus módulos e cada forno tem seus intervalos de controle de processo (ANACLETO 2021).

A TABELA 9, apresenta um FSC no intervalo de [102 – 106], o módulo de sílica [2,39-2,46] e o módulo de alumínio [1,47 – 1,53]. Estes intervalos, estão dentro da carta de qualidade da empresa Supremo Secil e, portanto, o controle de módulos foi excelente durante a produção de farinha

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CLÍNQUER

As análises do clínquer foram realizadas no laboratório interno da empresa Supremo Secil. A tabela 11 mostram as médias das análises dos óxidos e a mineralogia do clínquer produzido.

TABELA 10 – RESULTADOS DAS ANÁLISES XRF E XRD DO CLÍNQUER PRODUZIDO

Composição Química	Clínquer
SiO ₂ %	19,67
Al ₂ O ₃ %	4,73
Fe ₂ O ₃ %	3,20
CaO %	63,82
MgO %	5,74
SO ₃ %	1,43
Na ₂ O %	0,17
K ₂ O %	0,98
Cl %	0,0130
LSF	101,62
MS	2,45
MA	1,47
ALITA (C3S), %	71,50
BELITA (C2S), %	6,20
CAO LIVRE %	0,55

ALUMINA (C3A) %	3,25
FERRITA (C4AF) %	12,65

FONTE: O autor (2022)

Os óxidos do clínquer são os mesmos analisados ao da farinha alimentada, a concentração se dá pelo processo de descarbonatação do carbonato de cálcio e magnésio que ocorrem no processo segundo SILVA et al. (2018). A análise do clínquer produzido apresentou uma média de C3S de 71,50% da sua mineralogia, valor dentro da carta de controle de qualidade [66 – 72] % . O C3S é o principal mineral de controle de processo e qualidade; se o C3S estiver acima do intervalo de controle reflete um maior consumo de combustível, elevando o consumo térmico do processo e aumento o custo variável de produção. Cada planta industrial deverá encontrar a melhor relação de intervalo de controle de C3S para otimizar custos de produção e qualidade dos cimentos.

4.4 BALANÇO TÉRMICO

O balanço térmico foi realizado com foco no cálculo do consumo térmico do forno e entendimento da atual matriz de combustíveis e uma futura otimização na utilização de combustíveis alternativos.

As medições e os cálculos de processo realizadas durante o balanço térmico, não foram disponibilizados pela empresa Supremo Secil que entende ser parte do sigilo tecnológico da empresa, porém os resultados macro do balanço assim como os percentuais de cada etapa estarão presentes neste tópico do trabalho.

4.4.1 Produção do forno

O fator farinha clínquer (FFC) foi calculado com base na pesagem de clínquer em balança rodoviária e no sistema de dosagem de farinha. A TABELA 11, apresenta o resultado das pesagens.

TABELA 11 – DETERMINAÇÃO FATOR FARINHA CLÍNQUER (PRODUTIVIDADE DO FORNO)

	Pesagem t	Tempo h	Prod. t/h	Prod. t/dia
Clínquer	1.750	12	145,84	3.500
Farinha	5.845	12	243,54	5.845

FONTE: O autor (2022)

O forno estava com produção de 3.500 toneladas por dia, conforme orçamento da empresa e o fator farinha medido foi de 1,67 conforme descrito na equação 9.

É importante obter o fator farinha clínquer porque as fábricas de cimento não medem a produção de clínquer e sim a alimentação de farinha. Recomenda-se fazer uma medição FCC anual para garantir os dados de produtividade e assertividade de estoques e inventários. O valor determinado pela FLSmith (2012) para o forno da Supremo de Adrianópolis – PR, estaria entre o intervalo [1,66-1,70], ou seja, o resultado de 1,67 está de acordo com as recomendações do fabricante.

Uma observação interessante é que pela TABELA 11, são introduzidos no sistema 5.845t/dia de farinha e são produzidos 3.500t/dia de clínquer, a diferença em quase sua totalidade é transformada em CO₂. O processo de clínquerização é precedente de um processo de descarbonatação dos óxidos de cálcio e magnésio, no qual ocorre a formação e a liberação do CO₂.

4.4.2 Balanço térmico

Com a produção do forno aferida e todas as outras medições de processo realizadas, é possível fazer o balanço térmico do forno e determinar seu consumo térmico que é a energia disponibilizada pela matriz de combustíveis. A TABELA 12, apresenta o resultado do balanço térmico em cada etapa.

TABELA 12 – RESULTADOS DO BALANÇO TÉRMICO

Entradas	kJ/kg clínquer	Kcal/kg clínquer	% Energia
Combustíveis	3.247,3	776,1	92,4
Fósseis	2.171,6	519,2	
Alternativos	1.075,7	257,1	
Farinha alimentada	224,4	53,6	6,4
Ar do queimador	5,5	1,3	0,2
Ar do resfriador	38,5	9,2	1,1
Total	3.515,7	840,3	100

Saídas	kJ/kg clínquer	Kcal/kg clínquer	% Energia
Calor de formação do clínquer	1.780,0	425,4	50,6
Evaporação água	10,9	2,6	0,3
Gases saída torre	859,6	205,4	24,5
Ar excesso Resfriador	310,0	74,1	8,8
Clínquer	183,2	43,8	5,2
Radiação / Convecção	309,3	73,9	8,8
Fechamento / Erro	62,7	14,9	1,8
Total	3.515,7	840,3	100

FONTE: Adaptado de TRIE ENGENHARIA (2021)

A TABELA 12, mostra o resultado do balanço térmico realizada pela empresa Supremo Secil. As entradas e saídas de energia estão expressão em kJ/kg de clínquer e em kcal/kg de clínquer, sendo esta última unidade de medida, a usual utilizada na indústria.

O primeiro item a ser verificado é o fechamento do balanço, que no presente trabalho foi calculado em 1,8% da energia total. Levando em consideração que o ensaio é feito em escala industrial, o resultado do balanço térmico foi considerado excelente, dado que para ter validade, a Supremo Secil exige um percentual erro menor que 5%.

O segundo item a ser analisado é o consumo térmico, principal foco deste trabalho. O valor de 3.247,3 kJ/kg ou 776,1 kcal/kg, primeiro resultado da tabela de entrada de energia é o somatório das energias referente ao calor de combustão dos combustíveis fósseis e alternativos.

O valor obtido de consumo térmico está abaixo da referência [790-820] kcal/kg proposta pela empresa FLSmidth para o forno de Adrianópolis com utilização de coprocessamento (FLSMIDTH 2022).

O terceiro item a ser analisado e calculado é a determinação da taxa de substituição dos combustíveis alternativos. Para este cálculo, basta dividir o valor de energia dos CAs pelo valor total de energia dos combustíveis.

$$Tx \text{ Substituição} = \frac{\text{Energia CAs}}{\text{Energia total combustíveis}} \quad (10)$$

O resultado da taxa de substituição é de 33,1%. Um resultado considerado bom para os padrões de qualidade dos combustíveis alternativos no Brasil, que apresentam em geral baixo PCI (menor que 16.736 kJ/kg ou 4.000 kcal/kg) e granulometria grosseira (maior que 50mm) (ABCP 2019).

Para maximizar a adição de combustíveis alternativos é necessário elevar sua qualidade (poder calorífico e granulometria), e este trabalho começa na geração dos resíduos e no seu processamento nas empresas que fazem seus *blends*. As empresas deveriam como base de seus ativos, equipamentos de análise dos PCI, %CI e % umidade dos blends gerados. A partir das análises poderiam obter diversos tipos de misturas e poderiam até precificar os melhores blends de resíduos.

4.4.3 Balanço Resfriador

O balanço de massa e energia do Resfriador, é parte do balanço térmico do forno, mas é usualmente analisado em separado para avaliar o comportamento do Resfriador de clínquer, além de ser um bom indicador para otimização do consumo térmico do processo uma vez que é o Resfriador que fornece os ares secundários e terciários no qual é o suprimento de oxigênio para queima no queimador principal e no calcinador.

Assim como ocorreu no balanço térmico do forno, os cálculos e medições de processo são de propriedade da empresa Supremo Secil e, a TABELA 13 apresenta o resumo dos resultados de entrada e saída de energia para o volume de controle Resfriador, conforme ilustrado anteriormente na FIGURA 44.

TABELA 13 – RESULTADOS DO BALANÇO TÉRMICO DO RESFRIADOR

Entradas	kJ/kg clínquer	Kcal/kg clínquer	% Energia
Calor Sensível Clínquer	1.714,6	409,8	97,8
Calor Sensível dos ventiladores de ar	38,5	9,2	2,2
Ar Falso	0,0	0,0	0,0
Total	1.753,1	419,0	100

Saídas	kJ/kg clínquer	Kcal/kg clínquer	% Energia
Ar secundário (950°C)	500,8	119,7	28,6
Ar terciário (950°C)	824,7	197,1	47,0
Ar de excesso (370°C)	309,6	74,0	17,7
Clínquer (230°C)	182,8	43,7	10,4
Radiação / Convecção	23,4	5,6	1,3
Fechamento / Erro	-88,3	-21,1	-5,0
Total	1.753,1	419,0	100

FONTE: O autor (2022)

O resultado do balanço de energia do Resfriador, apresenta um erro de -5%, valor considerado aceitável dentro dos padrões de controle da empresa Supremo Secil.

Para determinar a eficiência do Resfriador, é necessário somar a energia dos ares secundário e terciário e dividir pela energia do clínquer de entrada, conforme destaca a equação 11. Esta razão é a recuperação de calor do processo

$$\eta = \frac{\text{Energia Secundário} + \text{Energia Terciário}}{\text{Energia clínquer de entrada}} \quad (11)$$

De acordo com a equação 11 e os resultados da TABELA 13, a eficiência do Resfriador é igual a 77%, ou seja, 77% da energia que entra no Resfriador é recuperada para o processo de clínquerização. O controle do resfriador na indústria de cimento é a chave para uma operação estável em termos de concentração de oxigênio e redução do consumo de combustíveis. O resultado encontrado no balanço térmico do Resfriador é excelente de acordo com FLSmith (2012), que previa uma eficiência entre 70 a 75% para a fábrica de Adrianópolis.

4.4.4 Avaliação dos dados de processo

O balanço térmico é uma fotografia de um momento do processo de clínquerização, para repeti-lo, é um trabalho que envolve empresas terceiras, mão de obra interna e equipe de engenharia de processos com dedicação exclusiva durante praticamente dois ou três dias para executá-lo. O resultado do balanço térmico é uma confirmação que o processo está em conformidade ou que precisa ser corrigido em função do percentual de erro. Como o percentual de erro foi de 1,8% para o balanço do forno e de -5% para o resfriador, e o consumo térmico comportou-se dentro da faixa esperada, é necessário avaliar os dados operacionais de processo dia a dia com forno estável, para validar as melhores condições operacionais de forma a obter maior taxa de substituição de combustíveis fósseis em alternativos.

Para a avaliação do processo, os dados diários de qualidade do clínquer, qualidade dos combustíveis e dados operacionais do forno de clínquer foram analisados e expurgados os intervalos de paradas. As TABELAS 14, 15 e 16, mostram os dados coletados e filtrados na condição de forno estável.

TABELA 14 – DADOS OPERACIONAIS DO FORNO

Taxa de Substituição de CAs	Horas Operação, h	Alimentação Farinha, t/h	Combustível Queimador, t/h	Combustível Calcinador, t/h	Consumo CAs, t/h	Cons. Térmico, kJ/kg
< 20%	462,00	248,10	5,43	9,45	4,21	3.338
20-25%	950,00	248,31	5,38	7,86	6,16	3.329
25-30%	1006,00	249,42	5,24	7,10	7,32	3.318
30-35%	461,00	249,98	4,92	6,46	7,77	3.236
>35%	244	250,09	4,92	5,02	8,16	3.129
Média		249,18	5,18	7,18	6,73	3.270
Desvio Padrão		0,93	0,25	1,65	1,59	88

FONTE: O autor (2022)

Na TABELA 14, foi considerada a farinha alimentada para representar a produção. Conforme foi visto na equação 9, a alimentação média do forno foi de 249,18 t/h o que representa uma produtividade média de clínquer de 149,21 t/h (ressaltando que o fator farinha clínquer calculado no tópico 4.4.1 deste trabalho foi

de 1,67) e uma produção diária de 3.581 t de clínquer. A média de produção está acima do balanço térmico realizada em setembro de 2021, porém o consumo térmico está muito próximo. Os dados operacionais diários com forno estável, apresentam uma média de 3.270 kJ/kg e o resultado do balanço térmico foi de 3.247 kJ/kg. O comparativo dos dados diários de consumo térmico validam o balanço realizado.

É possível notar que mais de 1000 horas de operação, a taxa de substituição de CAs está no intervalo entre 25 e 30%. Para compreender esta tendência de concentração de dados neste intervalo, é necessário avaliar a TABELA 15 que representa os dados diários de qualidade dos combustíveis nas mesmas condições de forno estável.

TABELA 15 – DADOS QUALIDADE DOS COMBUSTÍVEIS

Taxa de Substituição de CAs	Horas Operação, h	PCI Carvão Mineral, kJ/kg	PCI Coque Petróleo, kJ/kg	PCI CAs, kJ/kg	% Carvão Calcinador
< 20%	462,00	18.091	32.799	17.616	46,52
20-25%	950,00	18.812	32.785	18.177	47,40
25-30%	1006,00	18.647	32.703	18.485	46,15
30-35%	461,00	18.533	32.466	20.131	50,47
>35%	244	18.852	32.746	21.399	52,80
Média		18.749	32.699	19.161	48,67
Desvio Padrão		154	136	1.562	2,86
Desvio Padrão%		0,8%	0,4%	8,2%	

FONTE: O autor (2022)

A qualidade dos combustíveis utilizados no processo de clínquerização é avaliado pelo seu poder calorífico inferior. A TABELA 15 evidencia que o coque de petróleo é o melhor combustível por liberar a maior energia específica, além de ter um desvio menor que 0,5%. O outro combustível fóssil utilizado é o carvão mineral, embora tenha menor energia liberada durante a combustão, apresenta um desvio em suas análises menor que 1%. Ambos os combustíveis fósseis, coque de petróleo e carvão mineral, são fontes estáveis de energia, o que é ótimo para quaisquer processos de combustão. No entanto, os combustíveis fósseis apresentam custos em termos de R\$/GJ elevados e estão atrelados à cotação do barril de petróleo que no

atual momento econômico encontra-se em patamares elevados conforme a FIGURA 45.

FIGURA 45 - COTAÇÃO BARRIL DE PETRÓLEO 2020 - 2022



FONTE: Trading View (2022)

A utilização de combustíveis alternativos é uma alternativa economicamente importante para despressurizar os custos de produção além de ser uma solução ambientalmente adequada para redução de resíduos destinados a aterros sanitários. O problema no consumo dos combustíveis alternativos é a sua variação de poder calorífico inferior. Apesar de ter valores absolutos próximos ao carvão mineral, a tabela 16 mostra que o percentual de desvio chega a quase 10%, no qual em processos industriais é uma grande variação, gerando instabilidades operacionais. Se compararmos o percentual de substituição do balanço térmico, 33%, o PCI estava com 20.865 kJ/kg de acordo com a tabela 8. Se fizermos uma interpolação deste valor de poder calorífico inferior na tabela 16, que representa dados operacionais com forno de clínquer estável, poderíamos ter uma taxa de substituição no intervalo de 30 – 35%, ou seja, novamente comprova que o balanço térmico realizado é uma fotografia fidedigna da operação da empresa Supremo Secil. Percebe-se pela tabela 16 que a maioria das horas de produção, a qualidade em termos de poder calorífico inferior dos CAs estão na faixa de 18.500 kJ/kg resultando em taxas de substituição próxima a 25%. Para garantir maiores taxas de substituição sem perder a produtividade do forno, é necessário o aumento do poder calorífico dos combustíveis alternativos.

Para finalizar as análises dos dados operacionais, é importante entender como se comportou a qualidade do clínquer produzido. A TABELA 16, mostra os resultados de qualidade do clínquer em função de cada intervalo de taxa de substituição de combustíveis alternativos.

TABELA 16 – DADOS QUALIDADE DO CLÍNQUER

Taxa de Substituição de CAs	Horas Operação, h	FSC	MA	MS	C3S	CaO Livre
< 20%	462,00	101,39	1,50	2,51	66,70	1,20
20-25%	950,00	101,52	1,47	2,51	66,50	1,30
25-30%	1006,00	101,80	1,46	2,51	67,20	1,29
30-35%	461,00	101,83	1,45	2,51	67,80	1,16
>35%	244	102,16	1,43	2,50	68,10	0,97
Média		101,74	1,46	2,51	67,26	1,18
Desvio Padrão		0,30	0,03	0,00	0,69	0,14

FONTE: O autor (2022)

A qualidade do clínquer produzido foi estável, comprovando que a análise de dados foi feita da forma coerente. O melhor resultado de um processo estável é o seu produto ter uma qualidade controlada. No caso do processo de clinquerização, podemos medir este indicador de qualidade através da formação da alita, ou C3S. A média de C3S produzido foi de 67,26% com um desvio padrão de 0,69. O % de C3S também é um indicador secundário de consumo térmico. Se a química do processo estiver dentro dos parâmetros estabelecidos, valores elevados de C3S significam que o processo está com consumo de energia desnecessária, ou seja, aumento do consumo de combustíveis.

O clínquer amostrado no balanço térmico teve um valor de 71,50 de C3S com uma CaO livre de 0,55. Este alto valor de C3S e baixa CaO livre, pode-se interpretar que no balanço térmico, o forno estava com excesso de energia, ou seja, o consumo de combustível poderia ser otimizado, mesmo com um consumo térmico de 3.247 kJ/kg considerado adequado conforme as garantias de projeto. (FLSmith 2012).

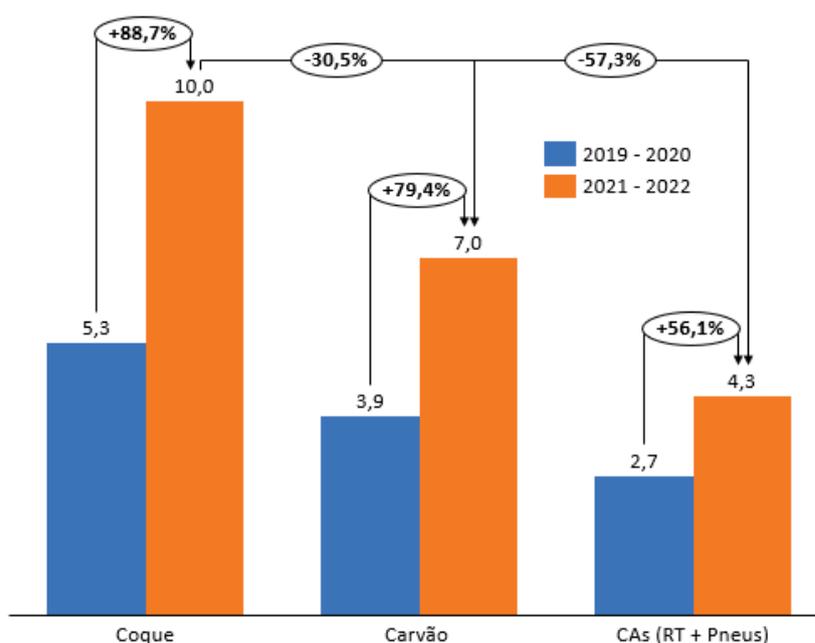
4.5 AVALIAÇÃO DO CUSTO DA ENERGIA

A avaliação de quanto custa o pacote de energia de cada combustível é fundamental para tomada de decisões sobre a matriz energética de cada empresa. O método mais usual para esta avaliação é a comparação R\$/GJ dos combustíveis. Para cálculo deste indicador, basta saber o custo do combustível, valor de aquisição mais o frete, e dividir pela quantidade de energia consumida no processo, que é a massa do combustível multiplicado pelo poder calorífico inferior. O R\$/GJ é apurada de forma mensal, assim como todo custo industrial.

O valor de R\$/GJ neste trabalho serão fictícios, já que estes dados são sigilosos e não foram disponibilizados, porém os percentuais de diferença de valor entre cada combustíveis serão reais para entendimento do *gap* entre cada fonte energética.

O coque de petróleo terá um valor arbitrado de R\$ 10/GJ. A partir deste valor, o carvão mineral e os combustíveis alternativos poderão ser calculados a partir de percentuais reais praticados na indústria de cimento, conforme indicado pela FIGURA 46.

FIGURA 46 – COMPARAÇÃO R\$/GJ



FONTE: O autor (2022)

O custo dos combustíveis fósseis tiveram uma elevação superior a 80%, enquanto os alternativos subiram praticamente a 60% entre os anos de 2019/2020 para 2021/2022 em detrimento do aumento de demanda de combustíveis fósseis causada principalmente para cenário do conflito entre a Rússia e Ucrânia.

A utilização de combustíveis alternativos representa um fator importante na redução de custos industriais pois possibilita uma de diminuição até 57% comparado ao custo do coque. O problema dos combustíveis alternativos no Brasil, é a qualidade dos materiais que apresentam alta granulometria, um baixo poder calorífico inferior e uma alta variação de qualidade química comparado ao coque de petróleo. Estas características podem acarretar perdas de produção e o efeito de se obter uma economia com a taxa de substituição, torna-se inviável caso haja perdas significativas no processo. A TABELA 15 elucida a relação entre qualidade dos CAs e sua taxa de substituição sem perder a produtividade do forno de clínquer.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do trabalho apresentado pode-se concluir que em processos industriais com reatores a combustão como é o caso das indústrias de cimento, é fundamental caracterizar sua matriz de combustível para entender sua qualidade. Análises elementares, imediatas e determinação do poder calorífico superior e/ou inferior auxiliam a equipe de engenharia e operação nas tomadas de decisão visando estabilidade operacional.

O balanço térmico do forno e do resfriador tornam-se ferramentas importantes de validação e otimização de processo, pois conseguem medir e aferir os dados mostrados no controlador. A mobilização de uma equipe para realização de um balanço é onerosa para a empresa, mas os resultados adquiridos são importantes para correção de rota e otimização energética do processo.

O consumo térmico medido pelo balanço térmico e o calculado pela média diária dos dados operacionais foram mutuamente validados. Valores de 776 kcal/kg ou 3.240 kJ/kg com coprocessamento de resíduos é considerado um valor abaixo da referência segundo o manual de operação do fabricante FLSmidth (2012). Certamente, o processo encontra-se estável e bem operado.

A eficiência de recuperação de calor do resfriador foi outro item avaliado com desempenho superior ao determinado pelo fabricante FLSmidth (2012). Um resfriador bem operado, apresenta uma camada de clínquer estável, com a quantidade de ar adequado para uma boa recuperação de calor no qual retorno ao processo de clínquerização, reduzindo o consumo de combustíveis. O próprio resultado do balanço do resfriador, certifica o consumo térmico medido pelo balanço térmico do forno.

A qualidade do clínquer manteve-se estável durante o balanço térmico, porém com valor de C3S elevado na faixa de 70-71%. Valores elevados de C3S indicam excesso de combustível durante a clínquerização. Comparando os dados diários com forno estável, o C3S apresenta valores mais baixos na faixa de 67%.

A qualidade dos combustíveis alternativos no balanço térmico do forno estava com PCI superior a 20.800 kJ/kg, e na maioria das horas estáveis de operação, o CA apresenta uma média de 19.100 kJ/kg, uma diferença de 8% em energia. O poder calorífico é fundamental para elevar as taxas de substituição dos combustíveis fosseis pelo alternativos. A empresa Supremo Secil disponibilizou mais de 3.000 horas de operação com forno estável, ou seja, forno com alta produtividade e diferente taxas

de substituição. Fica evidente que quanto maior o PCI, maior a taxa de substituição. O resultado mais importante deste trabalho, é a estabilidade de produção e qualidade do clínquer em diferentes taxas de substituição de combustíveis alternativos.

Em termos de custo, a utilização de combustíveis alternativos representa uma alavanca importante na redução de custos industriais pois representa 57% de redução comparado ao custo do coque. Vale enfatizar que o setor que fabrica ou processa os blends de resíduos para as indústrias de cimento, precisará melhorar a qualidade dos materiais que atualmente, apresentam alta granulometria a um baixo poder calorífico inferior comparado ao coque de petróleo.

REFERÊNCIAS

- ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTOS PORTLAND. **Panorama do coprocessamento 2019**: ano base 2017. ABCP. 2019. Disponível em: <https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Panoramacoprocessamento_2019_v2-bx.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2021.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697 07/2018: Cimento Portland Requisitos.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8289 12/2014: Carvão Mineral – Determinação do teor de cinzas.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9092 12/2014: Coque – Determinação do teor de cinzas.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14832 04/2002: Determinação de cloreto pelo método íon seletivo.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14656 02/2001: Análise química por espectrometria de raio X.
- AHAMED, J. U.; MADLOOL, N. A.; SAIDUR, R.; SHAHINUDDIN, M. I.; KAMYAR, A.; MASJUKI, H. H. Assessment of energy and exergy efficiencies of a grate clinker cooling system through the optimization of its operational parameters. **Energy**, v. 46, n. 1, p. 664–674, 2012.
- ANACLETO, T. F. **Avaliações Energética, exergética e otimização de uma unidade industrial utilizada para a produção de clínquer**. Dissertação de Mestrado apresentado ao Departamento de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte – MG Brasil, 2021.
- BATTAGIN, A. F.; CARDOSO, F. D. **Panorama do coprocessamento de resíduos em fornos de cimento no Brasil**. Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto. Foz do Iguaçu – PR Brasil, 2018.
- BEN. **Balanco Energético Nacional**. EPE: Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2012.
- BHATTY, J. I. Role of minor elements in cement manufacture and use. Skokie (Illinois): Portland Cement Association Ed., Rapport R&D serial N°109T, 40p., 1995.
- BIZZO, W.A. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Apostila do curso de graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas – SP Brasil, 2003

BRASIL, N.I. do. **Introdução à Engenharia Química**. Editora Interciência. 2ª edição. Rio de Janeiro. 2004.

BRUKER. Espectrômetro Raio X. Disponível em: <<https://www.bruker.com/pt/products-and-solutions/elemental-analyzers/xf-spectrometers/s8-tiger.html>> Acesso em: 02 abr.2022.

ÇAMDALI, Ü.; ERIŞEN, A.; ÇELEN, F. Energy and exergy analyses in a rotary burner with pre-calcinations in cement production. *Energy Conversion and Management*, v. 45, n. 18–19, p. 3017–3031, nov. 2004.

CIA. DE CIMENTO ITAMBÉ, **Cimento: fabricação e características**. Material de treinamento interno. Curitiba: Itambé, 2002.

CIMENTO.ORG – Mundo do cimento. **Panorama Mundial em 2013**. Disponível em: <<http://cimento.org/cimento-mundo-2013>> Acesso em 10 nov.2021.

CIMENTO.ORG – Mundo do cimento. **Cimento no Brasil**. Disponível em: <<http://cimento.org/cimento-no-brasil>> Acesso em 10 nov.2021.

CIMENTO ITAÚ. **Manual técnico: cimento, cal e argamassas** - Cimento Itaú, 1995.

CETRIC. Central de Tratamento e Disposição de Resíduos Industriais e Comerciais. Disponível em: <<http://www.cetric.com.br>>. Acesso em 12 nov de 2021.

COSTA, A.B; KIPPER, L.M; GERBASE, A.E; DOPKE, H.B; DAEHN, C.M. Determinação do poder calorífico no controle qualidade de combustíveis para sistemas de geração de energia e aquecimento industrial. XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador – BA, 2009.

DYNAMIS – Dynamis Engenharia e Comercio LTDA. **Memorial descritivo do projeto conceitual do aumento de capacidade do forno da Supremo Secil**. Relatório técnico. Direito técnico pertencente da empresa Supremo Secil. São Paulo – SP Brasil, 2021

DUDA, W. H. Cement Data Book, International Process Engineering in the Cement Industry. 3 rd ed. Germany: Bauverlag, 1985.

FAGUNDES, L.B. **Matriz de combustíveis**. Relatório técnico. Direito técnico pertencente empresa Supremo Secil. Adrianópolis – PR Brasil, 2021.

FARENZENA, H. V. **Manual Técnico - Fabricação de Cimento Portland**. Cimento e Mineração Bagé, 1990.

FARENZENA, H. V. **Potencial técnico das cinzas volantes na fabricação de Cimento Portland**, 1995.

FARIA, D. G. **Captura, armazenamento e utilização de dióxido de carbono na indústria de cimento**. Dissertação de Mestrado apresentado ao Departamento de

Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte – MG Brasil. 2018

FERNANDES, A.P.V. **Avaliação do desempenho de aditivos à base de amina no processo de moagem de cinza fly ash na empresa Pozosul**. Relatório de estágio supervisionado apresentado ao curso de graduação em engenharia química da Universidade do Sul de Santa Catarina. UNISUL, Tubarão – SC Brasil, 2007.

FLSMITH, Apresentação do projeto Adrianópolis 3000 tpd clínquer. Figuras e dados obtidos da apresentação. Adrianópolis/PR, 2012.

FLSMITH, Catálogo técnico Moinho de Cimento Vertical OK. Edição 2015. Disponível em: <https://flsmidth-prod-cdn.azureedge.net/-/media/brochures/brochures-products/milling-and-grinding/2017/fls-ok-mill_pt.pdf?rev=d4a27073-08ce-467c-bf49-e8aff4d2955b> Acesso em 13 mar.2022.

FLSMIDTH, CF Raw Meal Silo. Edição 2011. Disponível em: < https://flsmidth-prod-cdn.azureedge.net/-/media/brochures/brochures-products/storage-and-dispatch/cf-raw-meal-silo---low-res_en.pdf?rev=410b28ce-0cf8-4340-90e4-f0d7e7a48a33> Acesso em: 14 nov. 2021.

FLSMIDTH, Centaurus. Disponível em: <<https://www.flsmidth.com/en-gb/products/sampling-preparation-and-analysis/qcx-centaurus-combined-mill-and-press>> Acesso em 02 abr. 2022.

GOMES, F.C.S.P et al. Biometanização seca de resíduos sólidos urbanos: estado da arte e análise crítica das principais tecnologias. Eng. Sanit. Ambient. [online]. 2012, vol.17, n.3, pp.295-304.

HIMMELBLAU, D. M.; J. B., **Engenharia Química –Princípios e Cálculos**, 7ªed., Rio de Janeiro, LTC, 2006.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS. Manual de combustão. São Paulo – SP Brasil. 2010.

KABIR, G.; ABUBAKAR, A. I.; EL-NAFATY, U. A. Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant. Energy, v.35, n. 3, p. 1237–1243, 2010.

KELLY, E.G.; SPOTTISWOOD, D. J. Introduction to Mineral Processing. New York: Wiley, 1982, 491p.

KIHARA1, Y. A indústria do cimento e o desenvolvimento do Brasil. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br>>Acesso em 20 mar. 2022.

KIMO INSTRUMENTS. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/kimo/product-11846-266584.html>> Acesso em: 03abr.2022

LIMA, A.B. **O Processo Produtivo do Cimento Portland**. Monografia apresentada ao curso de especialização em Engenharia de Recursos Minerais da Universidade Federal de Minas Gerais. UFMG, Belo Horizonte – MG Brasil, 2011.

LOCHER, F. W. Development of environmental protection in the cement industry. Z K G, N°5, p. 112-117, 1989.

MARQUES, L.M.L. **Coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer – Aspectos do desempenho ambiental associado aos metais pesados**. Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. UFSC, Florianópolis – SC Brasil, 2000.

NASA – NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/features/GlobalWarming/page3.php>> Acesso em 19 mar.2022

NEGREIROS, A.R. **Considerações sobre a indústria do gás natural do Brasil**. Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Pós-graduação de Engenharia de Produção da Universidade Estadual do Norte Fluminense. UENF, Campos dos Goytacazes – RJ Brasil, 2013.

PERRY, R.H.; Green, D.W. **Perry's Chemical Engineer's Handbook**, 8th ed., McGraw-Hill, 2007.

PINHEIRO W.F., Ferreira Filho O.B., Neves C.A.R. 2016. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas**. Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral, 31 p.

PRIES, R. **Uso de lodo de esgoto para coprocessamento em fornos de clínquer**. Dissertação apresentado ao Programa de Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial, MAUI. UFPR, Curitiba – PR Brasil, 2018.

SANDLER, S. Chemical, biochemical, and engineering thermodynamics. Hoboken, N.J.: J. Wiley, 2006.

SECIL GROUP. Instrução técnica IT L 06 09 – Balanço Energético a Forno de Clínquer. 2013.

SILVA, A. E. G. O., PINTO, A.M.S., OLIVEIRA, B.H., CARVALHO, M.T.T., MACHADO, T.M., SOUZA, T.R., ANACLETO, T.F. Ferramenta para construção de cenários de processos industriais: Um estudo do uso de combustíveis alternativos numa planta de cimento, 2017.

SILVA, A.E.G.O. **Otimização multiobjetivo do custo de produção e eficiência exergética do processo de produção de clínquer em uma unidade de piroprocessamento**. Dissertação de Mestrado apresentado ao Departamento de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte – MG Brasil. 2022.

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. 2019. Disponível em: <<http://snic.org.br/cimento.php>> Acesso em: 10 nov. 2021.

SUPREMO SECIL CIMENTOS. Apresentação Institucional. Adrianópolis – PR Brasil .2021

SUPREMO SECIL CIMENTOS. Procedimentos e Instruções Técnicas. Adrianópolis – PR. 2022

SUPREMO SECIL CIMENTOS. Disponível em <<https://www.supremocimento.com.br/concreto/>> Acesso em: 19mar.2022.

TRIE ENGENHARIA. Relatório Balanço Térmico de Adrianópolis PR. 2021

VENTEC AMBIENTAL. **Manual técnico de instalação, operação e manutenção de filtros de manga**. Indaiatuba – SP. 2010

VILLAR L.F.S. 2002. Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento da Bauxita. Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro – RJ Brasil, 461 p.

VLÁSSOV, D. Combustíveis, combustão e câmaras de combustão, IEL - FIEP - SEBRAE - Departamento de Energia, 83p., 1998.

YADAV, S. B. Pollution control techniques in cement industry, National Council for Cement and Building Materials, New Delhi, India, p. 879-911, 1992.

VDZ - Verein Deutscher Zementwerke e. V. (Hrsg.) - **Umweltdaten der deutschen Zementindustrie** 2016, Dusseldorf. Agosto de 2012. Disponível em: <http://www.vdzonline.de>> Acesso em: 14nov.2021