

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Análise Termoeconômica do Processo  
de Produção de Cimento Portland com  
Co-processamento de Misturas de Resíduos**

**Autor: Luiz Gonzaga de Paula**

**Orientador: Prof. Dr. Rogério José da Silva**

Itajubá, Fevereiro de 2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Análise Termoeconômica do Processo  
de Produção de Cimento Portland com  
Co-processamento de Misturas de Resíduos**

**Autor: Luiz Gonzaga de Paula**

**Orientador: Prof. Dr. Rogério José da Silva**

**Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica**

**Área de Concentração: Conversão de Energia**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Itajubá, Fevereiro de 2009

M.G. – Brasil

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Análise Termoeconômica do Processo  
de Produção de Cimento Portland com  
Co-processamento de Misturas de Resíduos**

Autor: **Luiz Gonzaga de Paula**

Orientador: **Prof. Dr. Rogério José da Silva**

Composição da Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio** – IFET - MG

**Prof. Dr. Francisco de Sousa Junior** – IFET - MG

**Prof. Dr. Genésio José Menon** – IEM/UNIFEI

**Prof. Dr. Rogério José da Silva, Presidente** – IEM/UNIFEI

## **Dedicatória**

*À minha esposa Lucia Helena  
e aos meus filhos  
Alexandre e Cristiane*

## **Agradecimentos**

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Rogério José da Silva, pela competência, dedicação, paciência e amizade. Obrigado por ter compartilhado comigo a sua experiência.

Ao Prof. Dr. Genésio José Menon pelos estímulos constantes durante esta caminhada.

Ao coordenador do curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, prof. Dr. José Juliano de Lima Junior, pela colaboração e amizade.

Aos Professores da Universidade Federal de Itajubá, Paulo Shigueme Ide, Nelson Manzanares Filho e Sdnei Alves de Brito (in memoriam) pelo apoio e valiosas aulas, que contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEL, representado pelos seus dedicados Professores e Funcionários, pela oportunidade que me concedeu na realização deste trabalho,

Aos meus pais, João F. de Paula e Salima Rahal de Paula (in memoriam), que sempre me incentivaram na minha formação e no meu desenvolvimento cultural.

A todos aqueles que de alguma forma me deram uma palavra de incentivo.

Muito obrigado!

“A ciência será sempre uma busca,  
jamais um descobrimento real.  
É uma viagem, nunca uma chegada”.

Karl Popper

“A sociedade moderna esquece que  
o mundo não é propriedade de uma  
única geração”

Oskar Kokoschka

## Resumo

**PAULA, L. G. (2009)**, *Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co-Processamento de Misturas de Resíduos*, Itajubá, 158p. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

A indústria de cimento Portland apresenta como característica um elevado consumo de energia térmica no processo de produção de clínquer nos fornos rotativos. Com o propósito de redução deste consumo de energia, novas tecnologias têm sido incorporadas, tais como melhorias nos pré-aquecedores e a introdução de pré-calcinadores com queima secundária de combustível e com fornecimento de ar terciário. A introdução de tais técnicas em uma planta de cimento permite que resíduos oriundos de diversos ramos industriais possam ser co-processado sem causar danos ao meio ambiente e sem alterar a qualidade do cimento produzido. Deste modo, o co-processamento é uma técnica que se consagrou nas indústrias de cimento por promover simultaneamente a redução de custo na produção devido ao consumo reduzido de combustível principal e também por reduzir o volume de resíduos que seriam dispostos no meio ambiente. Este trabalho apresenta uma análise termoeconômica do processo de fabricação de cimento, com a adição de pneus inservíveis para substituir parte do combustível principal utilizado no processo. O estudo foi realizado considerando os parâmetros de uma planta de cimento dotada de pré-aquecedor de ciclones e outra com pré-aquecedor de ciclones e pré-calcinador. Como resultados são apresentados as comparações entre as eficiências racionais e os resultados das análises termoeconômica para os dois processos secos de produção de cimento.

### ***Palavras chave:***

Indústria de cimento, fornos rotativos, co-processamento, resíduos, pneus inservíveis, exergia, termoeconomia.

## **Abstract**

PAULA, L. G. (2009), **Thermoeconomic Analysis of Production Processes of Portland Cement with Co-processing of Residues Mixtures**. Itajubá. 158p. MSc. Dissertation - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

The Portland Cement industry presents as feature a high consumption of thermal energy in the production of clinker in rotary kilns. With the aim of reducing the consumption of energy, new technologies have been incorporated, such as improvements in preheaters and the introduction of precalciners with secondary burning of fuel and supply of tertiary air. The introduction of such techniques in a cement plant allows waste from various industries can be incorporated as a secondary fuel without harming the environment and without changing the quality of cement produced. Thus, the co-processing is a technique that is enshrined in the cement industry to promote both the reduction of production cost due to reduced consumption of fuel and also to reduce the volume of waste would be disposed in the environment. This paper presents an thermoeconomic analysis of the process of clinker manufacture with the addition of used tires as fuel secondary in the process. The study was performed considering the parameters of a cement plant with a preheater and another with precalciner. As a result, comparisons are made between the energy efficiency and the results of the thermoeconomic analysis for the two processes of production of dry cement.

### ***Keywords:***

Cement industry, clinker, rotary kilns, exergy, wastes, used tires, co-processing, thermoeconomy.

## Sumário

<b>SUMÁRIO</b>	<b>I</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>VIII</b>
<b>SIMBOLOGIA</b>	<b>XI</b>
<b>LETRAS LATINAS</b>	<b>XI</b>
<b>LETRAS GREGAS</b>	<b>XII</b>
<b>ABREVIATURAS</b>	<b>XII</b>
<b>SIGLAS</b>	<b>XIII</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo do Trabalho	2
1.2 Contribuição do Trabalho	3
1.3 Delineamentos do Trabalho	3
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>5</b>
<b>HISTÓRIA E TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO</b>	<b>5</b>
2.1 História do Cimento Portland	5
2.2 Processos de Fabricação do Cimento Portland	6
2.2.1 Tecnologia do Processo de Fabricação de Cimento	11
2.2.1.1 Obtenção e preparação das matérias-primas	12
2.2.1.2 Pré-aquecimento e pré-calcinação	17
2.2.1.3 Clinquerização	19
2.2.1.4 Adições ativas	26
2.2.1.5 Moinho de cimento	27

2.2.1.6 Expedição -----	27
2.3 Química do Cimento e sua Nomenclatura -----	28
2.3.1 Reação de Formação do Clínquer -----	28
2.3.2 Módulos de Controle da Mistura -----	33
2.3.2.1 Módulo de sílica (MS) -----	34
2.3.2.2 Módulo de alumina (MA) -----	34
2.3.2.3 Fator de saturação de cal (FSC) -----	35
2.3.2.4 M Módulo hidráulico (MH) -----	36
2.4 Composição Típica dos Cimentos -----	37
2.5 Tipos e Classificação de cimento Portland -----	40
2.5.1 Tipos de Cimento Portland Fabricados no Brasil -----	41
2.5.2 Cimentos Portland Comuns e Cimentos Portland Compostos -----	42
2.5.3 Cimento Portland de Alto-forno -----	43
2.5.4 Cimento Portland Pozolânico -----	44
2.5.5 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) -----	45
2.5.6 Cimento Portland Resistente aos Sulfatos -----	45
2.5.7 Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação -----	46
2.5.8 Cimento Portland Branco -----	47
2.5.9 Cimento Portland para Poços Petrolíferos (CPP) -----	47
2.5.10 Prescrições Normativas -----	48
2.6 Características Físico-químicas e Mecânicas dos Cimentos Portland -----	49
2.7 Produção de Cimento Portland -----	52
2.7.1 Produção Mundial de Cimento Portland -----	52
2.7.2 Produção Nacional De Cimento Portland -----	54
<b>CAPÍTULO 3 -----</b>	<b>56</b>
<b>COMBUSTÍVEL E ENERGIA ELÉTRICA NA PRODUÇÃO DE CIMENTO</b>	
<b>PORTLAND -----</b>	<b>56</b>
3.1 Introdução -----	56
3.2 Combustíveis Convencionais na Indústria de Cimento -----	58
3.2.1 Coque de Petróleo -----	58
3.2.1.1 Coque fluido -----	59
3.2.1.2 Coque verde -----	59
3.2.1.3 Característica do coque de petróleo -----	60
3.2.2 Carvão Mineral -----	61

3.2.2.1 Classificação dos carvões minerais -----	62
3.2.2.2 Características do carvão mineral brasileiro -----	64
3.2.2.3 Reservas de carvão mineral -----	66
3.2.3 Carvão Vegetal-----	67
3.2.4 Óleo Combustível-----	68
3.2.5 Gás Natural-----	69
3.2.5.1 Composição e características do gás natural bruto-----	70
3.2.5.2 Composição e características do gás natural comercial-----	71
3.2.5.3 Características do gás natural liquefeito (GNL) -----	72
3.2.5.4 Vantagens e desvantagens da utilização do gás natural-----	73
3.2.5.5 Gás natural na indústria de cimento-----	74
3.3 Combustíveis Alternativos na Indústria de Cimento -----	74
3.3.1 Resíduos Proibidos de serem Co-processados em Fornos de Cimentos -----	76
3.3.2 Resíduos que podem ser Co-processados em Fornos de Cimentos -----	76
3.3.3 Co-processamento de Pneus Inservíveis -----	77
3.3.4 Uso de Pneus, TDF Como Combustível Alternativo-----	79
3.3.4.1 Formas de alimentação dos pneus -----	81
3.3.4.2 Restrições devidas às emissões de poluentes -----	81
3.4 Energia Elétrica -----	83
3.4.1 Consumo de Energia Elétrica nos Processos -----	83
3.4.2 Custo de Energia Elétrica no Processo de Produção -----	84
<b>CAPÍTULO 4 -----</b>	<b>86</b>
<b>ANÁLISE EXERGÉTICA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO CLÍNQUER -----</b>	<b>86</b>
4.1 Introdução -----	86
4.2 Eficiência Térmica Calculada pela 1ª Lei da Termodinâmica -----	87
4.3 Conceitos de Exergia-----	88
4.4 Procedimentos e Equações para Determinação da Exergia -----	89
4.4.1 Equações para Calcular a Exergia dos Gases -----	89
4.4.2 Equações para Calcular a Exergia dos Sólidos-----	90
4.5 Definição da Eficiência Racional -----	92
4.6 Dados Utilizados no Cálculo da Análise e da Eficiência Exergética -----	92
4.7 Análise de um Sistema de Produção de Clínquer com Forno Rotativo dotado de pré-aquecedor de quatro estágios -----	95
4.7.1 Composição Química do Clínquer -----	97

4.7.1.1 Composição dos principais compostos do clínquer -----	97
4.7.2 Análise Exergética Para Produção de Clínquer com o Combustível MIX-A -----	98
4.7.2.1 Principais Características Técnicas do Processo de Produção -----	98
4.7.2.2 Combustão -----	99
4.7.2.3 Fluxo de Gases e Sólidos -----	101
4.7.2.4 Cálculo da exergia dos fluxos -----	102
4.7.2.5 Eficiência Térmica do Sistema -----	104
4.7.3 Análise Exergética Para Produção de Clínquer com o Combustível MIX-B -----	105
4.7.3.1 Principais Características Técnicas do Processo de Produção -----	105
4.7.3.2 Combustão -----	106
4.7.3.3 Fluxo de Gases e Sólidos -----	108
4.7.3.4 Cálculo da Exergia dos Fluxos -----	110
4.7.3.5 Eficiência Térmica do Sistema -----	111
4.8 Análise de um Sistema de Produção de Clínquer com Forno Rotativo com pré- aquecedor de quatro Estágios e Pré-calcinador -----	112
4.8.1 Principais Características Técnicas da Instalação -----	112
4.8.2 Principais Características Técnicas do Processo de Produção -----	113
4.8.3 Combustão -----	113
4.8.3.1 Combustão no Queimador do Forno -----	113
4.8.3.2 Combustão nos Queimadores do Pré-calcinador -----	116
4.8.4 Fluxo de Gases e Sólidos -----	119
4.8.4.1 Cálculo da Exergia dos Fluxos -----	120
4.8.4.2 Eficiência Térmica do Sistema -----	123
4.9 Comparações de Resultados e Discussão -----	124
<b>CAPÍTULO 5</b> _____	<b>126</b>
<b>ANÁLISE TERMOCONÔMICA DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE CIMENTO</b> _____	<b>126</b>
5.1 Introdução -----	126
5.2 Teoria Termoeconômica -----	126
5.2.1 Matriz de Incidência e Definição de F, P, e L -----	129
5.2.2 Regra de Atribuição de Custo -----	130
5.2.3 Custos Exergoeconômicos -----	132
5.3 Análise Termoeconômica em um Forno com Pré-aquecedor de Quatro Estágios utilizando Combustível MIX-A -----	133

5.4 Análise Termoeconômica em um Forno com Pré-aquecedor de Quatro Estágios utilizando Combustível MIX-B -----	140
5.5 Análise Termoeconômica em um Forno com Pré-aquecedor de Quatro Estágios e Pré-calcinador utilizando Combustível MIX-C -----	142
<b>CAPÍTULO 6</b> _____	<b>149</b>
<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> _____	<b>149</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> _____	<b>153</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Fluxograma do processo de produção do cimento Portland. -----	12
Figura 2.2 – Mina de calcário a céu aberto. No fundo a fábrica de cimento. -----	12
Figura 2.3 – Britador de martelo capacidade 700 ton./h.-----	13
Figura 2.4 – Pré-homogeneização e estocagem do calcário. -----	14
Figura 2.5 – Pré-homogeneização do calcário e argila. -----	15
Figura 2.6 – Fluxograma do processo de secagem e moagem. -----	16
Figura 2.7 – Moinho de rolo com separador.-----	17
Figura 2.8 – Esquema do pré-aquecedor e pré-calcinador. -----	18
Figura 2.9 – Torre de cinco estágios com pré-aquecimento e pré-calcinador. -----	19
Figura 2.10 – Sala de Controle de uma fábrica de cimento. -----	20
Figura 2.11 – Supervisão e controle digital do processo. -----	21
Figura 2.12 – Otimização do controle. -----	21
Figura 2.13 – Forno rotativo com pré-aquecedor. -----	22
Figura 2.14 – Corte esquemático do forno. -----	22
Figura 2.15 – Detalhe do maçarico para queima de vários combustíveis. -----	23
Figura 2.16 – Chama e revestimento refratário interno ao forno. -----	23
Figura 2.17 – Resfriador de clínquer tipo “Cross-Bar”. -----	24
Figura 2.18 – Clínquer após resfriamento. -----	25
Figura 2.19 – Microscopia do clínquer. -----	26
Figura 2.20 – Esquema de uma instalação de moagem do cimento. -----	27
Figura 2.21 – Identificação das zonas de um forno rotativo de via úmida. -----	32
Figura 2.22 – Identificação das zonas de um forno rotativo de via seca c/ pré-aquecedor. ---	33
Figura 2.23 – Evolução média de resistência à compressão dos cimentos CP. -----	49
Figura 2.24 – Produção mundial de cimento em milhões de toneladas. -----	53
Figura 2.25 – Produção de cimento no Brasil em milhões de toneladas. -----	54

Figura 2.26 – Posição do Brasil na produção e consumo mundial de cimento. -----	55
Figura 3.1 – Unidade de coqueamento retardado de petróleo verde. -----	60
Figura 3.2 – Classificação do carvão com seu respectivo uso e reserva mundial. -----	63
Figura 3.3 – Vendas de carvão vegetal produzido no Brasil por setor de consumo. -----	67
Figura 3.4 – Corte de pneu para veículos de passeio. -----	79
Figura 3.5 – Depósito de pneus no pátio de uma fábrica de cimento. -----	82
Figura 4.1– Volumes de controle para a instalação do forno rotativo com pré-aquecedor de quatro estágios -----	103
Figura 4.2 – Esquema da instalação, indicando as temperaturas de operação em alguns pontos da instalação -----	103
Figura 4.3 – Esquema dos volumes de controle com fluxos dos sólidos e gases para instalação com forno rotativo equipado com pré-calcinador e pré-aquecedor de 4 estágios ---	121
Figura 4.4 – Esquema da instalação de via seca com forno rotativo com pré-aquecedor de 4 estágios e pré-calcinador -----	122
Figura 5.1 – Esquema representativo dos fluxos de Exergia num forno rotativo com pré-aquecedor de ciclones de quatro estágios -----	136
Figura 5.2 – Esquema representativo dos fluxos de Exergia num forno rotativo com pré-aquecedor de ciclones de quatro estágios e pré-calcinador -----	143

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Temperatura de reação dos compostos do clínquer-----	30
Tabela 2.2 - Calor de reação dos componentes de formação do clínquer-----	31
Tabela 2.3 - Efeitos do FSC no cru e no clínquer-----	36
Tabela 2.4 - Composição típica dos compostos do clínquer-----	39
Tabela 2.5 - Composição típica para cimento Portland, segundo a ASTM-----	41
Tabela 2.6 - Composição química percentual em massa, típica de um cimento Portland-----	41
Tabela 2.7 - Composição dos cimentos Portland comuns e compostos-----	43
Tabela 2.8 - Composição dos cimentos Portland de alto-forno e cimentos Portland Pozolânico-----	44
Tabela 2.9 - Composição do cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI)-----	45
Tabela 2.10 - Composição dos cimentos Portland branco-----	47
Tabela 2.11 - Nomenclatura dos cimentos Portland normalizados pela ABNT-----	50
Tabela 2.12 - Características físicas-----	51
Tabela 2.13 - Características mecânicas-----	51
Tabela 2.14 - Características químicas-----	52
Tabela 1.15 - Maiores produtores internacionais de cimento (milhões de toneladas)-----	53
Tabela 3.1 - Consumo Percentual de Energia no Setor de Cimento no Brasil (1970 a 2006)-----	58
Tabela 3.2 - Análise de 10 tipos de coque de petróleo-----	60
Tabela 3.3 - Resultados de análise de coque de petróleo-----	61
Tabela 3.4 - Principais Características dos Carvões Brasileiros-----	64
Tabela 3.5 - Propriedades dos Carvões Minerais do Brasil-----	64
Tabela 3.6 - Composição Média das Cinzas de Carvão Mineral de alguns países-----	65
Tabela 3.7 - Consumo de carvão mineral nacional em 2007 por setor-----	66
Tabela 3.8 - Tipos de óleos combustíveis especificados pelo DNC-----	69
Tabela 3.9 - Composição do gás natural bruto em alguns países-----	70

Tabela 3.10 - Composição do gás natural bruto no Brasil -----	71
Tabela 3.11 - Especificação para o gás natural comercializado no Brasil -----	72
Tabela 3.12 - Resolução CONAMA 258-----	77
Tabela 3.13 - Instrução Normativa nº 8 do IBAMA -----	78
Tabela 3.14 - Análise química de TDF e carvão mineral americano -----	80
Tabela 3.15 - Principais compostos químicos nas cinzas das amostras de TDF e carvão mineral -----	80
Tabela 3.16 - Valores médios de consumo de energia elétrica nas várias etapas de fabricação do Cimento Portland comum em kWh/t de cimento-----	84
Tabela 3.17 - Valores das tarifas - Sazonal azul-----	85
Tabela 4.1 - Principais componentes da farinha e do clínquer -----	93
Tabela 4.2 - Coeficientes e valores da exergia química padrão b <sup>o</sup> -----	93
Tabela 4.3 - Coeficientes e valores da exergia química padrão para o clínquer-----	94
Tabela 4.4 - Exergia química padrão e coeficientes para entalpia e entropia dos gases -----	95
Tabela 4.5 - Percentual das misturas de combustíveis em energia requerida -----	96
Tabela 4.6 - Composição química elementar individual dos combustíveis, em % de peso -----	96
Tabela 4.7 - Composição química das cinzas dos combustíveis utilizados, % em peso -----	97
Tabela 4.8 - Composição química do clínquer. -----	97
Tabela 4.9 - Consumo de combustíveis em kg/s para produção de 22,269 kg/s de clínquer.--	99
Tabela 4.10 - Quantidade de cada substância em kmol/s para produção de 22,269 kg/s. -----	99
Tabela 4.11 - Composição elementar do ar primário e ar secundário, em kmol/s. -----	101
Tabela 4.12 - Composição química elementar da farinha e do clínquer, em kmol/s. -----	102
Tabela 4.13 - Resultado dos cálculos de exergia Para produção de clínquer.-----	104
Tabela 4.14 - Resultados dos cálculos das eficiências térmica baseada na 1 <sup>a</sup> Lei e na 2 <sup>a</sup> Lei. -	105
Tabela 4.15 - Consumo de combustíveis em kg/s para produção de 19,75 kg/s de clínquer. 107	107
Tabela 4.16 - Quantidade dos elementos químicos em kmol/s.-----	107
Tabela 4.17 - Composição elementar dos gases, ar primário e ar secundário em kmol/s.-----	109
Tabela 4.18 - Composição dos elementos das cinzas dos combustíveis e do cru. -----	109
Tabela 4.19 - Composição química elementar da farinha e do clínquer, em kmol/s. -----	110
Tabela 4.20 - Resultado dos cálculos de exergia. -----	111
Tabela 4.21 - Resultados dos cálculos das eficiências térmica baseada na 1 <sup>a</sup> Lei e na 2 <sup>a</sup> Lei--	112
Tabela 4.22 - Consumo de combustíveis no forno rotativo em kg/s para produção de 34,72 kg/s de clínquer. -----	115
Tabela 4.23 - Quantidade dos elementos químicos no forno rotativo em kmol/s-----	105
Tabela 4.24 - Consumo de combustíveis no pré-calcinador-----	117

Tabela 4.25 - Quantidade de substância no pré-calcinador em kmol/s -----	118
Tabela 4.26 - Composição elementar dos gases, ar primário e ar secundário, em kmol/s-----	119
Tabela 4.27 - Composição química elementar da farinha e do clínquer, em kmol/s -----	120
Tabela 4.28 - Resultado dos cálculos de exergia para a instalação do forno rotativo com pré-aquecedor de quatro estágios e pré-calcinador para produção de 34,72 kg/s clínquer-----	122
Tabela 4.29 - Resultados dos cálculos da eficiência térmica baseada na 1ª Lei e na 2ª Lei----	123
Tabela 4.30 - Comparação da Eficiência Racional para os três processos analisados MIX-A, MIX-B e MIX-C -----	124
Tabela 5.1 - Volumes de controle do processo de produção em forno com pré-aquecedor de quatro estágios -----	134
Tabela 5.2 - Descrição dos Fluxos no Processo de Produção de Cimento em Forno Rotativo com Pré-aquecedor de Ciclonas de quatro estágios-----	135
Tabela 5.3 - Definição de Fuel, Produto e Perdas no processo em forno rotativo com pré-aquecedor de ciclonas de quatro estágios -----	136
Tabela 5.4 - Resultados dos cálculos do valor dos fluxos de Exergia, Custo Exergético e Custo Exergético Unitário para Combustível MIX-A -----	139
Tabela 5.5 - Resultados do Cálculo de Rendimento e Custos Unitários nos subsistemas do Forno com Pré-aquecedor de quatro estágios, MIX-A -----	139
Tabela 5.6 - Resultados do cálculo do valor dos fluxos de Exergia, Custo Exergético e Custo Exergético Unitário para Combustível MIX-B -----	141
Tabela 5.7 - Resultados do cálculo de Rendimento e custos unitários nos subsistemas do forno com pré-aquecedor de quatro estágio, MIX-B-----	141
Tabela 5.8 - Volumes de controle do processo de produção em forno com pré-aquecedor de 4 estágios e pré-calcinador -----	142
Tabela 5.9 - Descrição dos fluxos no processo de produção de cimento em Forno rotativo com pré-calcinador e pré-aquecedor de ciclonas -----	144
Tabela 5.10 - Definição de FUEL, PRODUTO e PERDAS no processo, em forno rotativo com pré-calcinador e pré-aquecedor de ciclonas de quatro estágios -----	144
Tabela 5.11 - Resultados do cálculo do valor dos fluxos de Exergia, Custo Exergético e Custo Exergético Unitário para combustível MIX-C -----	147
Tabela 5.12 - Resultados do cálculo de rendimento e custos unitários nos subsistemas do forno com pré-aquecedor de 4 estágio e pré-calcinador, MIX-C -----	147

## Simbologia

### Letras Latinas

A	Matriz de incidência dos fluxos em um sistema
$A_F$	Matriz de incidência de fluxos de “FUEL”
$A_L$	Matriz de incidência de fluxos de “PERDAS”
$A_P$	Matriz de incidência de fluxos de “PRODUTOS”
$A^{-1}$	Matriz de incidência inversa
B	Exergia, kJ/kg de clínquer
$B^*$	Custo exerético, kJ/kg de clínquer
$b^0$	Exergia química padrão, kJ/kmol
Cec	Consumo específico de calor, kJ/kg de clínquer
$C_{p_k}$	Calor específico de um composto, kJ/kmol.K
F	“FUEL” fluxo energia ou exergia num volume de controle
FSC	Fator de Saturação de Cal
h	Entalpia, kJ/kmol
I	Irreversibilidade, kJ/kg de clínquer
$k^*$	Custo energético unitário
$k^*_{Fi}$	Custo energético unitário do FUEL
$k^*_{Pi}$	Custo energético unitário do PRODUTO
L	“PERDAS” fluxo de energia perdida num V.C kJ/kg de clínquer
MA	Módulo de Alumina
MS	Módulo Sílica
n	Número de moles, kmol
$n_{el}$	Número de moles do elemento, kmol
P	“PRODUTO” fluxo de energia ou exergia num V.C., kJ/kg de clínquer
R	Constante universal dos gases, kJ/kg de clínquer.K
s	Entropia, kJ/kmol

T	Temperatura, K
T <sub>g</sub>	Temperatura gases, K
T <sub>s</sub>	Temperatura dos sólidos, K
w <sub>i</sub>	Fluxos de energia de entrada no sistema, kJ/kg de clínquer
X <sub>i</sub>	Porcentagem em peso de um dado componente
Y <sub>k</sub>	Fração molar

## Letras Gregas

$\Delta G^\circ$	Energia livre de Gibbs, kJ/kmol
$\Delta H_{ac}$	Diferença de entalpia no ar de combustão, kJ/kg de clínquer
$\Delta H_{cbt}$	Entalpia da reação de combustão a 25 °C, kJ/kg de clínquer
$\Delta H_{clq}$	Diferença de entalpia no clínquer, kJ/kg de clínquer
$\Delta H_{gases}$	Diferença de entalpia nos gases, kJ/kg de clínquer
$\Delta H_{reação}$	Entalpia de reação a 25 °C, kJ/kg de clínquer
$\Delta H_{sólidos}$	Diferença de entalpia nos sólidos, kJ/kg de clínquer
$\Delta H^\circ_{th}$	Entalpia teórica de reação, kJ/kg de clínquer
$\delta$	Porcentagem de irreversibilidade gerada em relação ao sistema, %
$\eta_{IL}$	Eficiência calculada pela Primeira Lei da Termodinâmica
$\eta_e$	Eficiência calculada pela Segunda Lei da Termodinâmica
$\psi$	Eficiência racional calculada pela Segunda Lei da Termodinâmica

## Abreviaturas

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina
CaO	Óxido de cálcio
CaO <sub>livre</sub>	Cal livre
C <sub>3</sub> A	Aluminato tricálcico
C <sub>4</sub> AF	Ferro aluminato tetracálcico
C <sub>2</sub> S	Silicato dicálcico
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de ferro

MgO	Óxido de magnésio
SiO <sub>2</sub>	Sílica
tEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
PCI	Poder Calorífico Inferior kJ/kg
kWh/t	quilo Watt hora por tonelada

## Siglas

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ANIP	Agencia Nacional do Petrólio
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAT	Best Available Techniques
BEN	Balço Energético Nacional
CEMBUREAU	European Cement Association
CIF	Cement Industry Federation
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ISO	International Organization for Standardization
SIECESC	Sindicato da Indústria da Extração de Carvão do Estado de SC
SNIC	Sindicato Nacional da Indústrias do Cimento
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

## Capítulo 1

### INTRODUÇÃO

O cimento Portland é um dos mais importantes materiais de construção a serviço da engenharia civil, com vasto campo de aplicação, utilizado particularmente para a realização das obras de concreto armado. O cimento é o produto de uso mais freqüente em todo mundo, sua produção é a maior em quantidade de massa de todos os produtos produzidos no mundo (Chattejee, 1993). A produção mundial de cimento Portland em 2005 superou 2,2933 bilhões de toneladas (CEMBUREAU, 2007). No Brasil a produção acumulada nos últimos doze meses (Julho/2007 a Julho/2008) atingiu 47,8 milhões de toneladas (SNIC, 2008). A produção de cimento Portland gera um volume imenso de dióxido de carbono. Isso se deve principalmente à grande quantidade de energia necessária para elevar a temperatura dentro dos fornos rotativos a aproximadamente 1.450°C, necessário para realizar a reação de clinquerização, e também, pelo fato de que o processo em si devido à calcinação da matéria-prima gera CO<sub>2</sub>. Para cada tonelada de cimento Portland produzido, aproximadamente 800 kg de CO<sub>2</sub> são emitidos para a atmosfera. A produção de cimento é responsável por cerca de 7% das emissões artificiais totais de CO<sub>2</sub> na atmosfera (Camões, 2005). Felizmente a indústria de cimento vem fazendo grandes esforços para amenizar esse quadro. Pesquisas científicas e novas tecnologias vêm sendo constantemente desenvolvidas e implementadas visando à economia de energia, redução das emissões de poluentes, melhoria na qualidade do produto e redução dos custos de produção. Com a implantação de novas tecnologias, a indústria de cimento vem se transformando em uma indústria ecologicamente sustentável. O cimento comum já é misturado com outros materiais, resíduos de outras cadeias produtivas, como

cinzas volantes e escória de alto forno, para fazer cimentos compostos para sustentar uma gama extensiva de aplicações na construção civil.

Atualmente várias indústrias cimenteiras já utilizam o co-processamento em seus fornos rotativos contribuindo para eliminar os passivos ambientais como pneus inservíveis e resíduos gerados por outras indústrias.

## **1.1 – OBJETIVO DO TRABALHO**

O objetivo deste trabalho é fazer uma análise energética e termoeconômica dos processos de produção de cimento Portland com clínquer comum e clínquer obtido com a técnica de co-processamento. A análise foi realizada considerando a composição das matérias-primas e combustível tradicionais como o coque de petróleo tanto nacional quanto o importado, o carvão mineral e moimha vegetal. Como combustível secundário à análise foi realizada considerando a introdução de resíduos industriais como raspas de pneus, resultando assim numa análise das influências ocorridas no processo de clinquerização.

O processo de produção de cimento a ser analisado será o processo de via seca com a produção do clínquer em um forno rotativo equipado com pré-aquecedor e outro com pré-calcinador de cinco estágios.

Para a realização da análise termoeconômica, será utilizada a análise pela eficiência racional, com base na Segunda Lei da Termodinâmica (Kotas, 1985) e a metodologia proposta por Lozano e Valero (1993). Termoeconomia, segundo a metodologia proposta pela Teoria do Custo Exergético, é um estudo termoeconômico que combina os conceitos de exergia e economia. O método utiliza a termoeconomia para valorar e alocar o custo da degradação da exergia ao longo do processo. Nestas análises são consideradas as transformações que passam as matérias-primas, desde o momento em que são misturadas e moídas, até a saída do moimho de cimento.

## 1.2 - CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

Com os objetivos apresentados anteriormente, após a realização do trabalho, a contribuição será o estudo da possibilidade e a viabilidade econômica da utilização de resíduos industriais de elevado poder calorífico gerados em quantidades suficientes para serem introduzidos ao processo de forma constante, visando a economia de combustíveis fósseis não renováveis, menor emissão de dióxido de carbono para a atmosfera, preservando a qualidade do cimento e propiciando um custo menor de produção de cimento Portland.

## 1.3 - DELINEAMENTOS DO TRABALHO

O **Capítulo 1** apresenta a introdução mostrando a importância da produção de cimento e suas inovações tecnológicas no contexto social e ambiental. Neste capítulo é salientado a importância do co-processamento como uma das soluções viáveis para reduzir o consumo de energia e a diminuição de emissões de dióxido de carbono. Ainda neste capítulo, apresenta-se os objetivos e a motivação do trabalho.

O **Capítulo 2** faz um breve relato histórico, apresenta o desenvolvimento da tecnologia de fabricação do cimento, identifica as reações químicas e suas respectivas temperaturas envolvidas no processo de formação do clínquer, mostram os vários processos de produção, a composição típica do cimento Portland, bem como sua classificação, tipos de cimentos fabricados no Brasil e no mundo, as normas técnicas existentes, a estatística de produção de cimento no Brasil e Mundo dos últimos anos e descreve um processo tecnologicamente moderno de produção de cimento utilizando equipamentos de última geração.

O **Capítulo 3** apresenta os principais combustíveis utilizados na produção de clínquer, suas características e custos, analisam o co-processamento de resíduos no processo de produção, o poder calorífico dos combustíveis e dos resíduos, bem como, suas cinzas que podem conter componentes importantes para o processo, mas podem conter, elementos como metais pesados que a partir de certo teor possa inviabilizar o co-processamento.

No **Capítulo 4** os processos de produção de clínquer são analisados, empregando a Segunda Lei da Termodinâmica. São calculadas as Eficiências Exergéticas no pré-aquecedor, pré-calcinador, forno rotativo e resfriador de clínquer, subdivididos em subsistemas. Nos

cálculos da exergia necessária a análise exergetica, foi considerada as reações químicas envolvidas em todo o processo de clínquerização, bem como, as trocas de calor e massa entre os gases e os sólidos. A análise de cada um destes processos indica os pontos de maior geração de irreversibilidade, indicando o caminho para melhoria destes sistemas.

No **Capítulo 5** é feita uma revisão da teoria termoeconômica aplicada nos processos de produção de cimento analisados no Capítulo 4, levando em consideração o consumo de energia elétrica nos processos de preparação, moagem e homogeneização da farinha crua, alimentação do cru, da torre de ciclones, operação dos sistemas de queima, ventiladores e bombas do forno e do resfriador, movimentação do forno rotativo, armazenamento e moagem final do cimento. Em cada processo foram identificados os fluxos correspondentes ao “COMBUSTÍVEL”, “PRODUTOS” e “PERDAS”, necessários à montagem da matriz de incidência e do vetor dos coeficientes, destinados aos cálculos dos Custos Exergeticos. Ainda neste capítulo são comentados os resultados obtidos dos estudos acima descritos.

O **Capítulo 6** apresenta as conclusões deste trabalho e descreve recomendações para trabalhos futuros.

As referências utilizadas neste trabalho são apresentadas no **Capítulo 7**.

## **Capítulo 2**

# **HISTÓRIA E TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO**

Este capítulo tem como objetivo dar uma visão da evolução dos processos de produção do cimento através dos tempos, analisar as principais características do cimento Portland, as principais reações químicas que ocorre durante o processo, os módulos de controles da mistura, a preparação das matérias-primas, a moagem, a homogeneização, a queima e a moagem final do cimento. Neste capítulo são apresentadas as normas técnicas pertinentes á produção de cimento bem como dados da produção de cimento no Brasil e no mundo.

## **2.1 - HISTÓRIA DO CIMENTO PORTLAND**

A palavra CIMENTO é originada do latim CAEMENTU, que designava uma pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4500 anos. Os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por uma mistura de gesso calcinado (Bugue, 1955). As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, que possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água.

O grande passo no desenvolvimento do cimento foi dado em 1756 pelo inglês John Smeaton, que conseguiu obter um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes aos de Smeaton, pela mistura de componentes argilosos e calcários. Ele é considerado o inventor do cimento artificial. Em 1824, o construtor inglês Joseph Aspdin queimou conjuntamente pedras calcárias e argila, transformando-as num pó fino. Percebeu que obtinha uma mistura que, após secar, tornava-se tão dura quanto as pedras empregadas nas construções. A mistura não se dissolvia em água e foi patenteada pelo construtor no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, que recebeu esse nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland, (Beuer, 1986). O Cimento Portland descoberto e patenteado pelo Aspdin era somente calcinado e não sinterizado, coube a I.C. Johnson, em 1847, descobrir que para obtenção de um cimento de melhor qualidade era necessária uma queima da mistura, além da temperatura de calcinação, bem como o uso de uma alta proporção de materiais calcários e argila (Silva, 1994). Depois da descoberta de Johnson, o Cimento Portland em seu aspecto fundamental da química de fabricação, não foi submetido a mudanças radicais segundo Fried and Rhuilhausen apud (Silva, 1994). Entretanto os processos de fabricação de Cimento Portland vêm sofrendo avanços tecnológicos consideráveis quanto ao uso racional de energia, emissões de poluentes e substituição de parte de combustíveis fósseis.

## **2.2 - PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND**

Cimento Portland é usualmente conhecido na construção civil como cimento. O cimento é um material existente na forma de um pó fino, com propriedades aglomerantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água. Depois de endurecido, mesmo sob a ação da água, ele não se decompõe mais.

O cimento Portland resulta da mistura em proporções adequadas do clínquer com outras substâncias, tais como o gesso que é o regulador do tempo de pega, e adições ativas, em proporções que dependem do tipo de aplicação e das características desejadas para o cimento. O cimento Portland comum é formado por aproximadamente 97% de clínquer e 3% de gesso. O clínquer que é o principal constituinte do cimento é produzido por transformação térmica a

elevadas temperaturas (aproximadamente 1450°C) em fornos rotativos, de uma mistura pulverizada, denominada de cru ou farinha, contendo aproximadamente 80% de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), 15% de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), 3% de trióxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e quantidades menores de outros constituintes, como o ferro, o enxofre, etc. Estas matérias-primas são normalmente extraídas em pedreiras de calcário, ou margas, localizadas geralmente nas proximidades das plantas de produção de cimentos e outros constituintes minoritários contidos em areias, minério de ferro, etc.

A matéria-prima após ser misturada e moída finamente é submetida a um processo de aquecimento que leva à produção final do clínquer. Por aquecimento, inicialmente evapora-se a água e outros materiais voláteis. Seguidamente na faixa de temperatura entre 500°C a 900°C procede-se à decarbonatação do material calcário, com produção de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e liberação de  $\text{CO}_2$  gasoso. Este processo denomina-se na indústria cimenteira como calcinação. Finalmente na temperatura entre 850°C até 1450°C dá-se a reação entre o óxido de cálcio e as substâncias sílica-aluminosas, originando o quarteto  $\text{C}_4\text{AF}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$  e  $\text{C}_3\text{S}$ , que constituirá o clínquer.

Embora a literatura cite vários tipos de instalações que produzam clínquer, atualmente todas trabalham com fornos cilíndricos rotativos, com comprimento, diâmetro e rotação, que variam de acordo com a produção desejada de projeto e do processo de produção ser de via seca ou via úmida. O forno rotativo é instalado horizontalmente, com uma inclinação que varia entre 2 a 4 %, através do qual circulam em contra corrente os gases de aquecimento resultantes da queima de um combustível, e a matéria-prima para a produção do clínquer. O forno é apoiado sobre vários rolamentos e roda com uma baixa rotação, entre 0,5 e 4,5 r.p.m. A matéria-prima é fornecida ao forno pela extremidade mais elevada e movimenta-se para a extremidade inferior por causa da rotação e inclinação do forno, saindo no extremo oposto já sob a forma de clínquer. O combustível é fornecido e queimado na extremidade mais baixa do forno, viajando os gases de queima em contracorrente com a matéria prima até a extremidade oposta. Os fornos estão revestidos internamente com material refratário que protege a sua carcaça de aço, dificulta a perda de calor para o exterior e permite a existência no seu interior de elevadas temperaturas, que na zona perto da saída do clínquer podem atingir temperatura de chama de aproximadamente 2000 °C.

Existem basicamente dois processos de produção de clínquer: por via úmida e por via seca. Nas unidades de via úmida a matéria-prima é moída juntamente com água sendo fornecida ao forno na forma de lama ou pasta. Nestes fornos, para a produção do clínquer é necessário

fornecer energia em excesso para proceder primeiro à evaporação da água contida na matéria-prima. Os fornos de via seca não usam água para moer a matéria-prima e esta é fornecida ao forno na forma de um pó fino, denominado cru ou farinha. Existem ainda processos intermediários denominados de via semi-seca e semi-úmida. Enquanto os processos de via úmida necessitam de valores de energia térmica acima de 5000 MJ, por tonelada de clínquer, um processo por via seca que opera com forno rotativo com pré-aquecedor e pré-calcinador de cinco ou seis estágios pode consumir somente 3000 MJ de energia térmica por tonelada de clínquer produzida (Silva, 1994). Os processos por vias semi-úmida e semi-seca têm consumos de energia intermediários entre estes dois extremos. Devido à sua ineficiência energética os sistemas por via úmida tendem a serem abandonados. Atualmente no Brasil toda a produção de cimento Portland é efetuada em fornos por via seca (SNIC, 2007).

Sendo assim, na análise termoeconômica deste trabalho, serão considerados somente os processos de via seca na produção de cimento com fornos rotativos equipados com pré-aquecedores de ciclones e com pré-calcinadores e pré-aquecedores de ciclones. Nestes sistemas as matérias-primas constituídas, principalmente de calcário e argila, passam inicialmente pela britagem e posteriormente pela etapa de moagem, quando outros materiais são adicionados para correção de módulos de controle, como areia e minério de ferro, de modo a obter uma composição otimizada para a produção de clínquer. Esta mistura homogeneizada é armazenada em pilhas a céu aberto, ou em silos cobertos ou fechados. As matérias-primas são moídas finamente em moinhos de bolas, e recebem para secagem o ar quente proveniente do forno, permitindo um melhor aproveitamento da energia térmica dos gases de combustão. Estes gases servem para separar e arrastar o material já moído, conduzindo a farinha para o sistema de separação e eliminação da poeira, sendo os gases expelidos para o exterior, pela chaminé, e a matéria-prima conduzida novamente para o forno.

Com o objetivo de aumentar a eficiência energética e reduzir o consumo de energia, foram projetados sistemas de produção de clínquer com fornos rotativos providos de ciclones pré-aquecedores que permitem a evaporação completa da água e o início da calcinação do cru antes da entrada no forno rotativo. Os pré-aquecedores atuais são constituídos por uma torre de ciclones montados em cascata, na vertical, descendo a farinha da parte superior na forma de pó em suspensão, em contracorrente com os gases de queima provenientes do forno rotativo. Os sistemas mais modernos com 6 estágios de ciclones atingem uma altura de aproximadamente de 120 metros. Nestes sistemas há uma mistura completa entre a matéria-prima e os gases de combustão, permitindo uma troca de calor eficaz. Os gases entram na base da torre de ciclones a

temperaturas acima dos 800 °C e saem no topo da torre a temperaturas da ordem dos 300 °C. Entre o pré-aquecedor, formado pela torre de ciclones e o forno rotativo é adicionado uma câmara de combustão especial, denominada pré-calcinador, onde quantidades da ordem dos 60% do combustível total podem ser queimadas. Esta energia é basicamente utilizada para descarbonatar a matéria-prima que entra no forno rotativo, quase totalmente calcinada. Para que não haja perda térmica, o ar de combustão fornecido ao pré-calcinador tem que ter uma temperatura elevada e para tanto, o calor que ele possui é obtido recuperando o processo de resfriamento do clínquer imediatamente após a saída do forno rotativo. Este ar é transportado por uma tubulação isolada termicamente, colocada paralelamente ao forno rotativo. Sistemas com pré-aquecedores com cinco torres de ciclones e pré-calcinador são tecnologias utilizadas pela maioria das indústrias cimenteiras brasileiras. (ABCP, 1996)

O clínquer sai na extremidade do forno rotativo a uma temperatura acima dos 1300 °C e necessita de ser resfriado bruscamente para fixar termodinamicamente as suas características químicas e cristalinas. O resfriamento pode ser efetuado em vários tipos de equipamentos, denominados de resfriadores de clínquer, que são responsáveis pelo resfriamento e recuperação de parte da entalpia contida no clínquer. Os resfriadores de grelha são o tipo mais indicado para sistemas dotados de pré-calcinador. Neste sistema de resfriamento, o clínquer quente cai da saída do forno sobre uma grade fixa e é deslocado através de um movimento recíproco de pratos que deslizam sobre as grades. O clínquer formado por partículas pequenas é resfriado por ar insuflado através das grades, provindo de compartimentos separados existentes por baixo. Estes compartimentos permitem a existência de duas zonas: uma zona de recuperação, em que o ar de resfriamento aquecido, vai servir de ar secundário para combustão do queimador principal do forno rotativo, e uma zona de pós-resfriamento onde ar excedente esfria o clínquer a temperaturas mais baixas, e posteriormente serve de ar terciário para a combustão no pré-calcinador.

O clínquer após resfriado é transportado para os silos de clínquer onde posteriormente é misturado e moído com gesso e outros aditivos, que permitem a obtenção de cimentos com características desejadas.

A energia térmica necessária para a fabricação do clínquer é obtida pela queima de uma variedade de combustíveis. Atualmente os mais utilizados pela indústria nacional são o carvão mineral, a moinha de carvão vegetal, o coque de petróleo e os co-processados utilizados como combustíveis alternativos, principalmente pneus usados, papel velho, resíduos industriais, etc. Uma fração importante da energia térmica libertada na combustão é utilizada para a

descarbonatação do calcário, que é uma reação endotérmica. Assim uma tonelada de clínquer necessita de um mínimo de 1700-1800 MJ para aumentar a sua entalpia acima da entalpia da farinha. A energia de combustão total consumida é bastante maior, já que é necessário evaporar a água absorvida e de hidratação presente na farinha e as perdas de calor para o exterior por convecção e radiação entre 10-15% e de calor sensível nos gases de saída entre 10-20% (Silva, 1994).

Num processo com a melhor tecnologia, com pré-aquecedor em torre de ciclones e pré-calcinador, a energia térmica total gasta por tonelada de clínquer é da ordem dos 3000 MJ. Sistemas equipados somente com ciclones pré-aquecedores podem gastar 3100-4200 MJ/t clínquer (BAT, 1999). A energia total consumida numa cimenteira é maior que estes quantitativos, devido à energia elétrica necessária para acionamento dos motores dos moinhos, movimentação dos sólidos, dos fluidos líquidos e gasosos, iluminação, etc. A energia elétrica representa usualmente 20% da energia total necessária à produção do cimento e tem valores de 90-130 kWh por tonelada de cimento produzido (CEMBUREAU, 1999).

A produção de clínquer e as reações térmicas associadas exigem uma permanência prolongada da matéria-prima dentro do forno. No forno rotativo principal existem pelo menos duas zonas, uma inicial de calcinação e outra final de sinterização. Os gases resultantes da combustão têm nestes fornos tempos de residência de 4 a 6 segundos a temperaturas acima dos 1200 °C, saindo pela chaminé após a troca de calor nos moinhos, com valores da ordem dos 150 a 300 °C (Freeman, 1983).

Devido às altas temperaturas mantidas na parte final do forno, um conjunto de compostos presentes na matéria-prima, ou no combustível, tais como sulfatos e cloretos de sódio e potássio, são volatilizados e arrastados pelos gases para a entrada do forno. Ao encontrarem temperaturas mais baixas, da ordem dos 800 °C, estas substâncias alcalinas condensam, sendo arrastadas novamente para o interior do forno. Dependendo do perfil térmico do sistema, a condensação pode dar-se ainda no interior do forno rotativo ou já na torre de ciclones do pré-aquecedor. Quando o último processo acontece pode surgir uma acumulação de álcali incrustado que entope os ciclones e que obriga a medidas de desencrustamento que por vezes podem causar até mesmo a paralisação da linha de produção. Este ciclo interno de álcali é mais intenso e importante quando a presença de sódio e potássio é elevada nas matérias-primas e/ou no combustível. Devido aos transtornos, no processo de fabricação é imprescindível a utilização de matérias-primas e combustíveis com níveis controlados deste material alcalino. Quando isso não é possível pode tornar-se necessária a existência de uma saída alternativa para uma parte dos gases

de queima (by-pass) de modo a retirar do circuito uma fração do álcali volatilizado no forno. Algumas unidades de fornos curtos, com pré-aquecedor ou pré-aquecedor e pré-calcinador, estão equipadas com um by-pass na zona entre a torre de ciclones e a entrada do forno, onde uma fração da ordem dos 5 a 30% dos gases do forno são desviados para um sistema de eliminação de pó, por vezes com uma chaminé separada. A instalação de by-pass para o álcali é evitada sempre que possível devido aos custos do equipamento, à diminuição da eficiência energética e a perda de matéria-prima na forma de pó de cimento. Normalmente nestes casos o limite máximo de entrada de cloro no forno é da ordem de 0,015% em peso (USEPA, 1999).

Uma linha de produção de clínquer não pode ser completamente estanque devido à existência de partes móveis, como o forno rotativo. Assim, para evitar fugas de materiais e produtos de combustão ao longo do sistema, toda a linha funciona em subpressão, sendo o movimento dos fluidos gasosos efetuado pelo vácuo gerado por ventiladores colocados na parte inicial da linha, imediatamente antes da chaminé. Uma parte substancial da energia elétrica consumida (da ordem dos 80%) é utilizada nos ventiladores de exaustão dos gases.

Por motivo de economia energética, a queima de combustível numa fábrica de cimento é realizada com um controle rigoroso dos fluxos de ar de combustão, trabalhando o sistema tão perto quanto possível das condições estequiométricas, usando somente um excesso de ar mínimo necessário para se obter uma combustão completa, minimizar os níveis produzidos de compostos orgânicos não queimados e de CO e produzir clínquer com qualidade. Valores de concentração de oxigênio à saída do forno rotativo de 2 a 4% são comuns. Entradas de ar não desejadas ao longo da linha fazem com que a concentração de oxigênio nos gases de saída na chaminé atinja normalmente valores da ordem dos 10%.

### **2.2.1 - Tecnologia do Processo de Fabricação de Cimento**

O processo de produção de cimento via seca, com pré-aquecedor e pré-calcinador foi o escolhido para análise por ser o processo de maior eficiência energética, maior produtividade, menor manutenção, menor custo de produção e o mais adequado para queima de combustíveis secundários, sendo conseqüentemente o processo ideal para co-processamento de resíduos e, cuja análise Termoeconômica é o objetivo principal deste trabalho. A Figura 2.1 mostra um fluxograma simplificado deste processo.

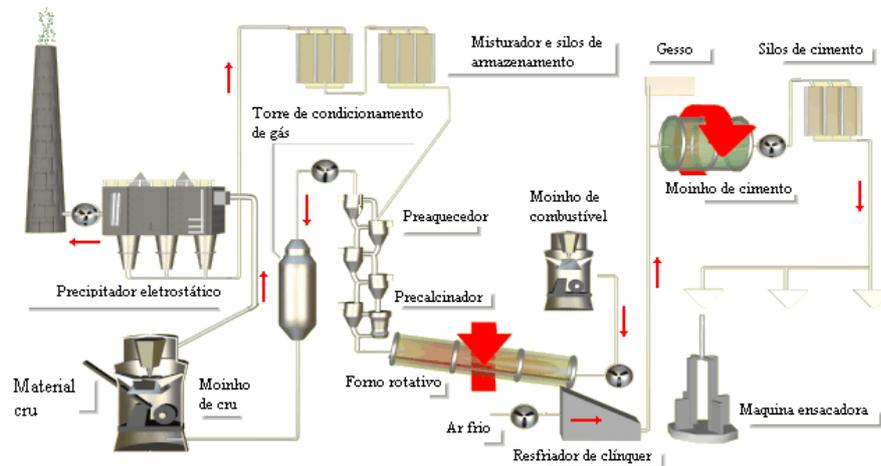


Figura 2.1 - Fluxograma do processo de produção do cimento Portland

### 2.2.1.1 – Obtenção e preparação das matérias-primas

**Calcário** - O calcário representa mais de 70% em peso na composição da matéria-prima crua (Silva, 1994), esta é uma forte razão para que as fábricas de cimento sejam localizadas próximas às jazidas. A extração do calcário segue as etapas de prospecção, mapeamento e projeto da lavra. A Figura 2.2 mostra uma mina de calcário a céu aberto onde se vê em segundo plano a fábrica de cimento.



Figura 2.2 – Mina de calcário a céu aberto. No fundo a fábrica de cimento.  
Fonte: Indústria cimento

A rocha calcária é explodida e as pedras são transportadas por caminhões basculantes ao britador primário, onde suas dimensões de mais ou menos 90 x 90 x 90 cm são reduzidas a

aproximadamente 20 x 20 x 20 cm. Simultaneamente, uma amostra do calcário segue para o laboratório, que fornece a análise para determinação das correções químicas necessárias e composição das matérias-primas. Em seqüência as pedras calcárias são transportadas para o depósito do britador secundário. O britador secundário reduz ao tamanho de um cascalho com aproximadamente 2,5 x 2,5 x 2,5 cm. Neste estágio é eliminada grande parte das impurezas presentes no calcário. Em algumas plantas este processo é realizado em um único estágio. Os tipos de britadores usados dependem da dureza das pedras processadas, em geral, são utilizados os britadores de mandíbulas e martelos. A Figura 2.3 mostra um britador de martelo com capacidade de 700 ton./h, e potência absorvida de 950 kW.

Após a britagem, amostras de calcário seguem para o laboratório para análise química para determinação dos teores de cálcio, silício, ferro e alumínio. O calcário segue em correias transportadoras para o pátio de pré-homogeneização.

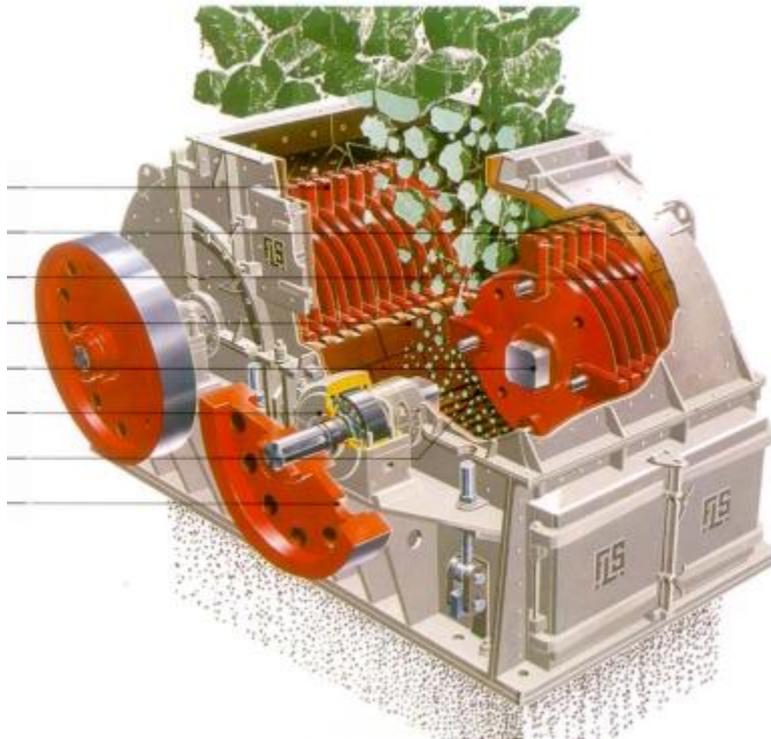


Figura 2.3- Britador de martelo capacidade 700 ton./h

Fonte: Catálogo F.L.SMIDTH

**Argila, areia e minério de ferro** - Argila, areia e minério de ferro, geralmente são encontrados em regiões externas à área da fábrica.

**Pré-homogeneização** - A pré-homogeneização garante a uniformidade da matéria-prima a ser utilizada na produção do clínquer. Um sistema automático deposita e homogeneiza o calcário em pilhas de até 30m de altura, conforme Figura 2.4. O calcário é armazenado junto com as outras matérias-primas. Na retirada do calcário e da argila de seus depósitos, é realizada uma segunda pré-homogeneização, conforme Figura 2.5. Nesta fase, as matérias-primas são submetidas, por amostragens, aos ensaios de granulometria e composição química.



Figura 2.4 - Pré-homogeneização e estocagem do calcário.  
Fonte: Catálogo F.L.SMIDTH



Figura 2.5 - Pré-homogeneização do calcário e argila.  
Fonte: Catálogo F.L.SMIDTH

**Dosagem das matérias-primas** - As matérias-primas, calcário, argila, areia e minério de ferro são armazenados separadamente em silos equipados com balanças dosadoras na base. Os técnicos analisam as matérias-primas e calculam as dosagens, com base em parâmetros químicos pré-estabelecidos (módulos químicos), que dependem das características de composição apresentada pelas matérias-primas estocadas. A dosagem de cada matéria-prima é feita por meio das balanças dosadoras automatizadas, controladas pelo Painel Central.

**Moagem da mistura** - Após a dosagem as matérias-primas são transportadas ao moinho vertical de rolos, onde são misturadas e moídas. Nesta fase inicial a mistura das matérias-primas e ao mesmo tempo sua pulverização, de modo a reduzir o tamanho das partículas a 0,05 mm em média, formando grânulos muito finos denominados de farinha ou cru. Quanto mais finos estiverem os grânulos, mais fáceis se tornam as reações químicas entre seus componentes. De hora em hora são coletadas amostras da farinha para controle de suas características físico-químicas.

**Secagem e homogeneização da farinha crua** - As fábricas modernas são projetadas para operar no processo de via seca. Porém a maioria das matérias-primas utilizadas na produção do cimento tem um teor de umidade em torno de 3% a 8%. Para conseguir uma moagem eficaz, é necessário secar a mistura.

A moagem e a secagem simultânea da mistura acontecem no moinho de rolos. Para melhor aproveitamento energético, a secagem é feita aproveitando os gases quentes residuais do pré-aquecedor que entra no moinho a uma temperatura entre 200 °C a 300 °C. As partículas secas que ainda não atingiram a granulometria desejada são retidas num separador de alta sensibilidade que as faz retornar ao moinho. Após atingir a granulometria desejada, a farinha é transportada ao silo de homogeneização, este está equipado com um sistema que movimenta a farinha para resfriá-la e homogeneizá-la. Os gases resultantes desta etapa antes de serem lançados à atmosfera passam por um filtro eletrostático que retém 99,9% do material particulado, as partículas, ainda presentes nos gases são precipitadas e voltam ao processo. Um elevador de canecas ou pneumático conduz a farinha ao silo especial que mantém o processo de homogeneidade da farinha. Para uma fábrica com capacidade de produção de 2 milhões de t/ano é necessário um silo de 8500 toneladas com 16 metros de diâmetro e 58 metros de altura. A cada período de 1 hora um robô coleta amostras da farinha e transporta pneumaticamente para o laboratório anexo à sala de comando. No laboratório a amostra é analisada num espectrômetro de fluorescência de Raios-X quanto à composição química da mistura. Os resultados da análise são transmitidos ao computador que corrige se necessário, a alimentação das matérias-primas ao moinho, comandando automaticamente as dosagens. Na saída do silo há uma balança que determina a quantidade de material que será enviado à torre de pré-aquecimento e pré-calcinação para ser transformada em clínquer. Um fluxograma do processo de secagem e moagem e seus equipamentos principais são mostrados na Figura 2.6 e os detalhes do moinho de rolo com separador são apresentados na Figura 2.7.

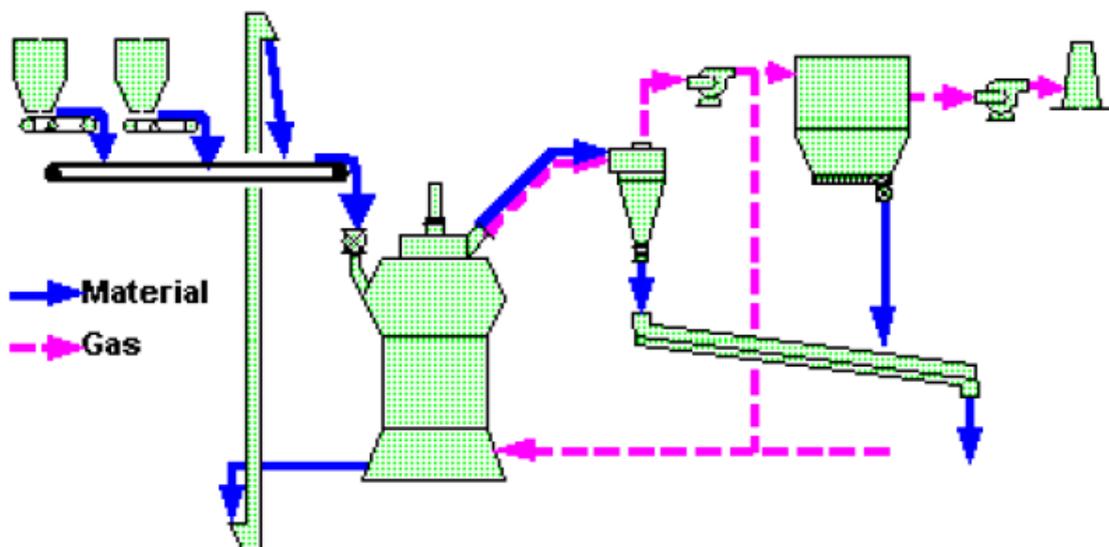


Figura 2.6 - Fluxograma do processo de secagem e moagem.

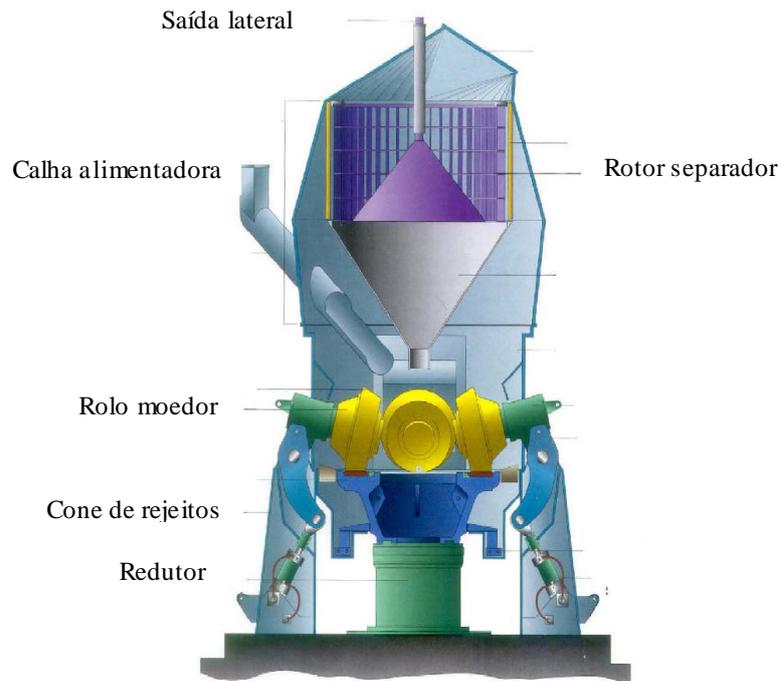


Figura 2.7 – Moinho de rolo com separador.

Fonte: Catálogo F.L.SMIDTH

### 2.2.1.2 - Pré-aquecimento e pré-calcinação

A farinha crua em forma pulverulenta é conduzida à torre de ciclones, aonde num trajeto descendente vai sendo pré-aquecida gradativamente pelos gases quentes que saem do forno em torno 1000 °C e se deslocam nas torres no sentido ascendente em contracorrente com a farinha crua. Nesta fase são iniciadas as reações químicas, onde as partículas da farinha alcançam à temperatura de início da pré-calcinação do carbonato de cálcio, por volta de 800°C, nesta fase a calcinação pode alcançar até 50 %, e em seguida a farinha passa pelo pré-calcinador que é um reator onde grandes quantidades da energia térmica são produzidas pela combustão de combustíveis secundários, que atingem temperaturas moderadas na ordem de 800 a 1100°C. Neste estágio aproximadamente 60% da quantidade total de combustível usado na produção do clínquer pode ser queimado para liberar 90 % do dióxido de carbono presente na mistura crua e aumentar o grau de calcinação em até 95% antes de entrar no forno rotativo. O ar terciário para combustão no calcinador é retirado do resfriador de clínquer através de uma tubulação externa ao forno, que é misturado com os gases do forno rotativo na entrada do calcinador, antes de ser usado na combustão. A reação de calcinação do carbonato de cálcio é fortemente endotérmica e consome cerca de 60 % do calor fornecido ao processo em uma

faixa de temperatura pequena e aproximadamente constante (Kwech, 1986). O aquecimento e a calcinação total do carbonato de cálcio consomem cerca de 95% do calor teórico das reações químicas (o valor teórico é 1700 MJ/t de clínquer), e as reações restantes para completar a clínquerização, consomem 5 % do total (Garrett,1985).

A Figura 2.8 apresenta um esquema do processo de pré-aquecimento e pré-calcinação e a Figura 2.9 mostra uma torre de ciclones com aproximadamente 60 metros de altura e a

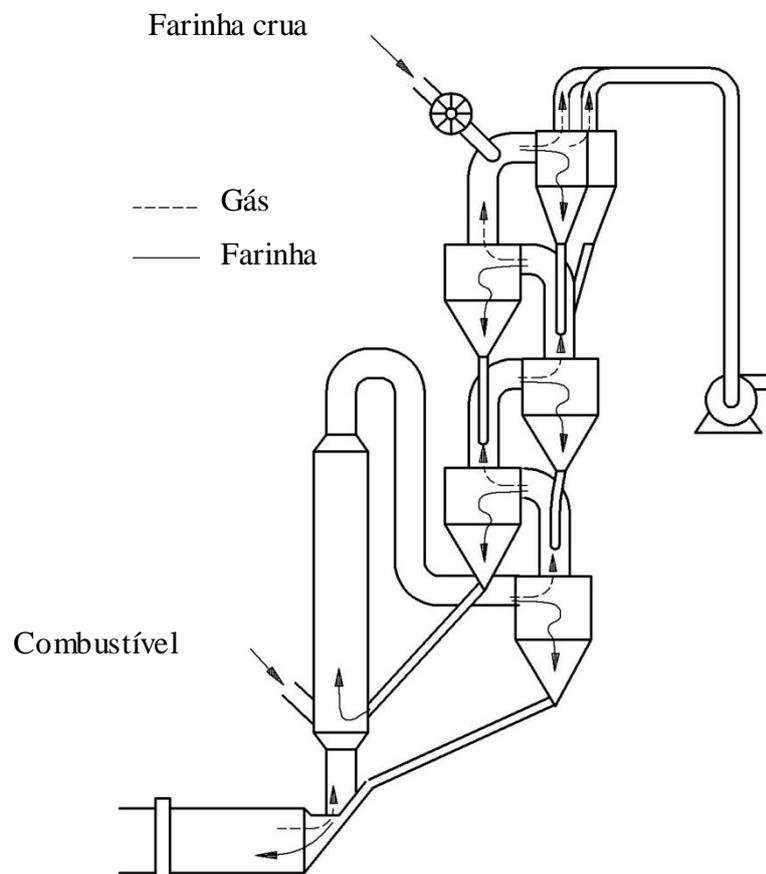


Figura 2.8 - Esquema do pré-aquecedor e pré-calcinador.



Figura 2.9 - Torre de 5 estágios com pré-aquecimento e pré-calcinador.

### 2.2.1.3 - Clinquerização

A clinquerização é o processo que ocorre dentro do forno rotativo onde se dá a transformação das matérias-primas em clínquer. O clínquer é um produto sintético resultante do tratamento térmico das matérias-primas até a fusão parcial com posterior reação química entre seus óxidos. O clínquer é constituído basicamente pelos silicatos alita ( $C_3S$ ) e belita ( $C_2S$ ), em torno de 75% e em menor quantidade por aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e ferro aluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ). Vale lembrar que a alita é o componente principal do clínquer, por ser o principal responsável pela resistência dos concretos aos 28 dias.

**Forno rotativo** - O forno rotativo de clinquerização consiste de um tubo cilíndrico de aço revestido com tijolos refratários especiais que protegem a chapa de aço das elevadas temperaturas no interior do forno, gira lentamente em aproximadamente 1 a 4 voltas por minuto e é ligeiramente inclinado, em torno de 2% a 8% em relação a horizontal. O material parcialmente calcinado entra na extremidade superior do forno, a gravidade e a rotação do forno permitem que o material flua para abaixo com uma velocidade praticamente uniforme em direção ao maçarico de aquecimento com temperatura de chama na ordem de  $2000^{\circ}C$ , posicionado na saída do forno (parte mais baixa do forno). O material passando pelo forno em contra fluxo com os gases quentes da combustão é aquecido gradativamente até atingir  $1450^{\circ}C$ , nesta fase em estado de fusão incipiente as reações químicas se completam dando

origem ao clínquer. A clinquerização é um processo crítico que requer um controle exato da entrada de energia térmica. Câmeras, robôs e instrumentos de medição digitais, posicionados estrategicamente no forno, são monitorados pela sala de controle da fábrica e permitem um controle eficaz do processo. Uma sala de controle equipada com sistemas digitais é mostrada na Figura 2.10, um esquema de supervisão e controle digital do processo é mostrado na Figura 2.11, um esquema da otimização do controle é mostrado na Figura 2.12, um forno rotativo com 5 metros de diâmetro externo, 60 metros de comprimento, equipado com pré-aquecimento e pré-calcinador, com capacidade nominal de produção de 2400 t/dia é apresentado na Figura 2.13, um corte do forno com detalhes é apresentado na Figura 2.14 e o detalhe do maçarico na Figura 2.15 e a Figura 2.16 mostra a vista da chama e revestimento refratário interno ao forno.



Figura 2.10 - Sala de Controle de uma fábrica de cimento.

Fonte: Catálogo CEMBUREAU.





Figura 2.13 - Forno rotativo com pré-aquecedor e pré-calcinador.  
 Fonte: Catálogo F.L.SMIDTH

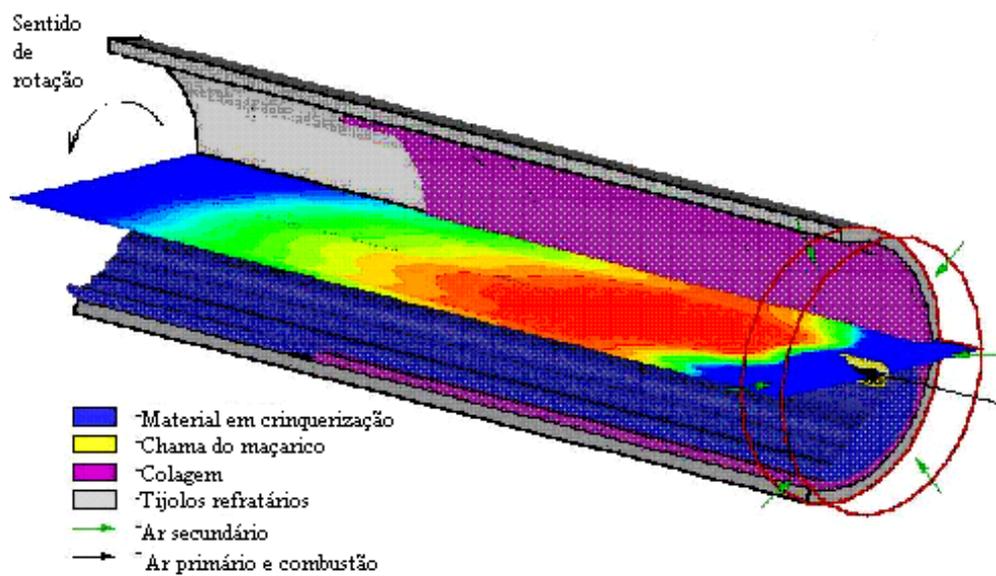


Figura 2.14 - Corte esquemático do forno.  
 Fonte: Catálogo F.L.SMIDTH



Figura 2.15 – Detalhe do maçarico para queima de vários combustíveis.  
Fonte - Catálogo F.L.SMIDTH



Figura 2.16 - Chama e revestimento refratário interno ao forno.

**Resfriamento do clínquer** - Este processo é importante para o término da reação química do clínquer. Ao sair do forno com temperatura de aproximadamente 1100 °C, o clínquer passa por um resfriador onde é resfriado bruscamente para aproximadamente 90 °C. É nesta fase que acontece a estabilidade, a decomposição dos cristais de alita, a formação da belita secundária, o conteúdo de cal livre secundária e a formação do aluminato cálcico, sendo que estes dois últimos componentes condicionam os fenômenos de expansão no cimento.

**Resfriadores de clínquer** - Resfriadores de clínquer são trocadores de calor responsáveis para o resfriamento e recuperação parcial da entalpia contida no clínquer, ao sair do forno. A recuperação desta entalpia melhora a eficiência térmica do sistema reduzindo o consumo de energia. Um bom resfriador deve ter uma eficiência térmica acima de 70%, isto pode ser conseguido reduzindo a vazão de ar de resfriamento, a fim de que a temperatura do ar secundário e terciário seja a maior possível. O ar quente resultante da troca de calor é utilizado para ar secundário de combustão, ar terciário no pré-calcinador e na secagem das matérias-primas. Os tipos mais comuns de resfriadores são os de tambor, os de satélites e os de grelhas. O resfriador de grelha é o tipo utilizado no processo com pré-calcinador. A Figura 2.17 mostra um resfriador de grelha tipo “Cross-Bar”, fabricação da F.L. Smidth.

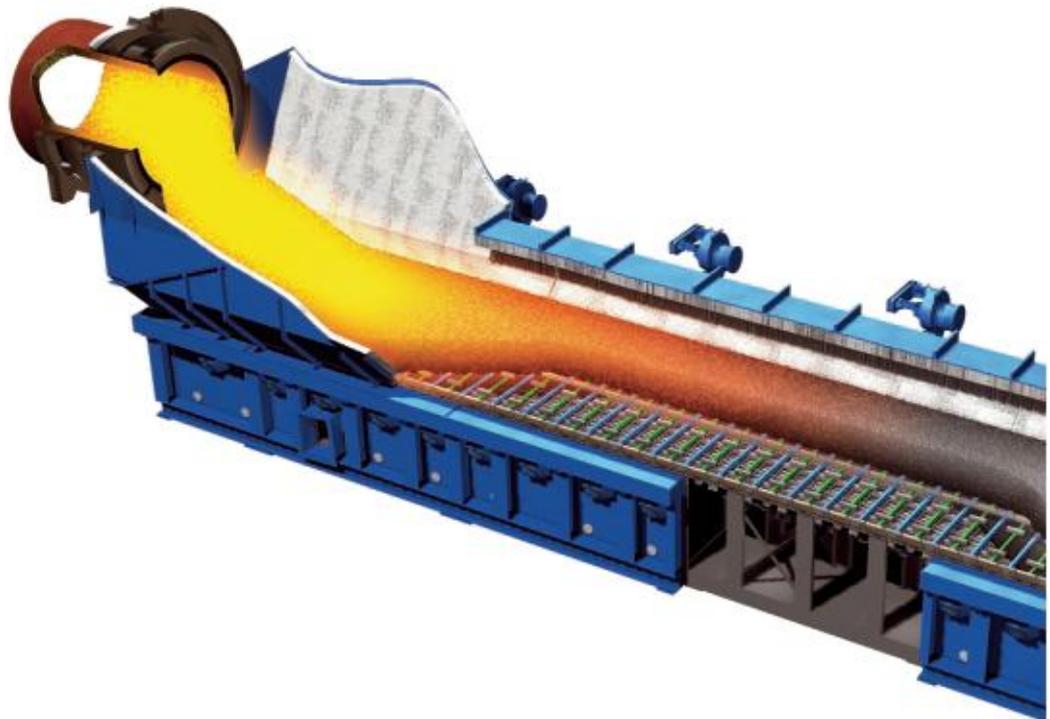


Figura 2.17 - Resfriador de clínquer tipo “Cross-Bar”.  
Fonte: Catálogo F.L.SMIDTH.

Na saída do resfriador o clínquer assemelha-se a pequenos seixos cinzentos, Figura 2.18. O clínquer pré-resfriado é transportado pneumaticamente para um galpão, onde ocorre o resfriamento final. Antes da estocagem, são realizados ensaios químicos e físicos no laboratório de Controle de Qualidade. No laboratório as amostras de clínquer são avaliadas quanto a:

**Fator de saturação:** Sua aprovação garante a reatividade do cimento;

**Cal livre  $C_aO$ :** Se estiver alto, o cimento ficará hidratado, podendo expandir e não conseguir alcançar a resistência estabelecida por normas.

**Microscopia:** Analisa se as moléculas se agruparam de forma correta após a queima e resfriamento. Figura 2.19.

Passando pelo controle de qualidade o clínquer é armazenado em silos e está pronto para a moagem final.

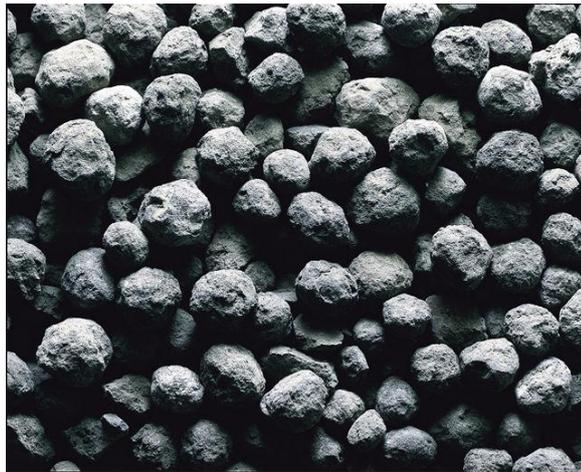


Figura 2.18 - Clínquer após resfriamento

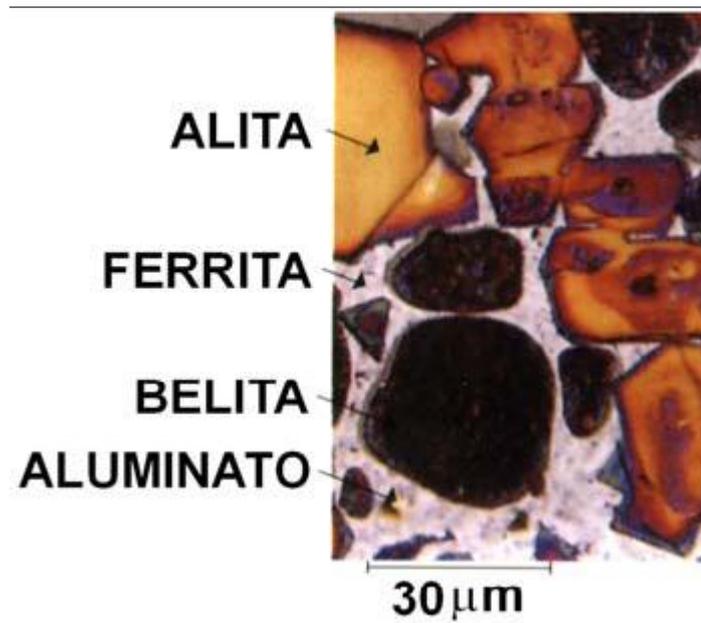


Figura 2.19 - Microscopia do clínquer.

#### 2.2.1.4 - Adições ativas

Adições ativas são outras matérias-primas com características aglomerantes que misturadas ao clínquer na fase de moagem, juntamente com o gesso compõem, os diversos tipos de Cimento Portland. O gesso age como regulador de início do tempo de pega, e não pode, em nenhuma hipótese, deixar de participar da mistura que compõe o Cimento Portland.

Os materiais aglomerantes mais utilizados na produção dos Cimentos Portland compostos são:

**Escórias de alto-forno** - É um subproduto da indústria siderúrgica e se assemelha aos grãos de areia grossa.

**Pozolânicos** - São rochas de origem vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizados.

**Fíler calcário** - Calcário **Materiais** finamente moído.

**Argilas calcinadas** - Certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas, entre 550 °C a 900 °C.

**Cinzas de carvão mineral** - Cinzas derivadas da queima de carvão mineral nas usinas, principalmente nas termelétricas.

**Cinzas de casca de arroz** - Cinzas resultantes da queima de cascas de arroz.

O clínquer, o gesso e as outras adições são armazenados separadamente antes de entrarem no moinho de cimento.

### 2.2.1.5 - Moinho de cimento

Dosados em balanças de precisão o clínquer e as outras adições ativas que determinam os diferentes tipos de cimentos e o gesso que age como regulador do tempo de início de pega, são levados ao moinho de cimento e sistemas complementares de separação, para alcançar a granulometria desejada e resultar no Cimento Portland. O cimento é transportado mecânica e pneumaticamente para os silos de produtos acabados, onde é estocado. Cada silo armazena um tipo de cimento produzido. Após os ensaios finais de qualidade o produto é liberado para expedição. O estoque é mantido ensilado e o ensacamento é feito somente no momento da expedição.

A energia elétrica gasta neste processo é de aproximadamente 25 kWh por tonelada de cimento, conseqüentemente, esta representa um item de peso no custo de produção. Preocupação adicional deve ser tomada para que o pó (partículas sólidas) não vaze e polua o meio ambiente. As fábricas de cimento são equipadas com filtros e todos outros equipamentos de segurança ambiental. A Figura 2.20 apresenta um esquema do processo de moagem do cimento.

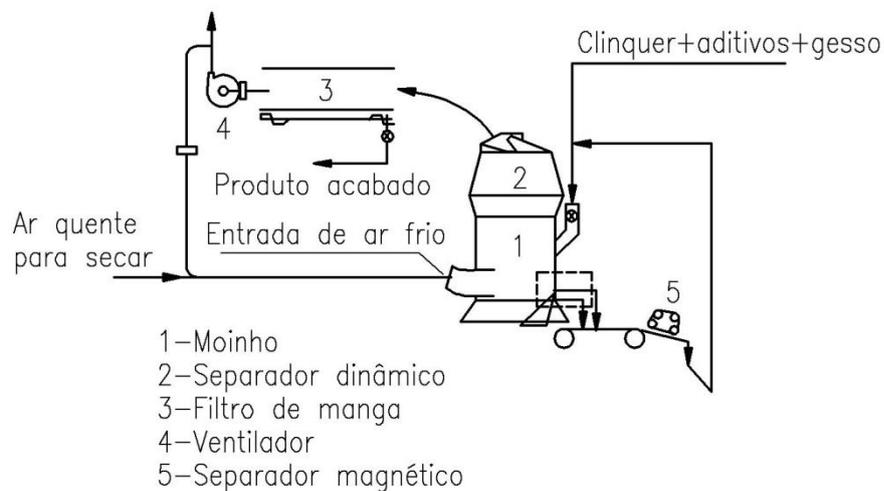


Figura 2.20 – Esquema de uma instalação de moagem do cimento.

### 2.2.1.6 – Expedição

O cimento pode ser fornecido a granel ou em sacos de 50 kg.

a) Fornecimento em sacos de 50 kg.

O ensacamento é feito em máquinas automáticas, que enchem os sacos e os liberam assim que atingem o peso de 50 kg. O carregamento também é automatizado, otimizando a expedição. A

embalagem é feita em papel “Kraft” de múltiplas folhas, para proteger o cimento da umidade e do manuseio no transporte, cada embalagem recebe data e hora de expedição.

b) Fornecimento a granel

O setor de granel é automatizado e pode atender simultaneamente vários caminhões.

## 2.3 - QUÍMICA DO CIMENTO E SUA NOMENCLATURA

Na química do cimento as fórmulas químicas estão freqüentemente expressas como uma soma de óxidos; por exemplo, o silicato tricálcico,  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ , pode ser escrito como  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ . Isto não implica que os óxidos constituintes têm qualquer existência separada dentro da estrutura. É usual abreviar a fórmula dos óxidos com letras únicas, como C para CaO ou S para  $\text{SiO}_2$ . Assim,  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ , na notação simplificada, fica  $\text{C}_3\text{S}$ .

As abreviações mais amplamente usadas são:

C = CaO	S = $\text{SiO}_2$	A = $\text{Al}_2\text{O}_3$	F = $\text{Fe}_2\text{O}_3$
M = MgO	K = $\text{K}_2\text{O}$	Š = $\text{SO}_3$	N = $\text{Na}_2\text{O}$
T = $\text{TiO}_2$	P = $\text{P}_2\text{O}_5$	H = $\text{H}_2\text{O}$	Č = $\text{CO}_2$

Este sistema é freqüentemente combinado com a notação química ortodoxa dentro de uma equação química, por exemplo, a Equação (2.1) representativa do silicato tricálcico:



Ou até dentro de uma fórmula única, como em  $\text{C}_{11}\text{A}_7\text{CaF}_2$  para  $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{32}\text{F}_2$ , e também na fórmula das fases de óxido simples (por exemplo, CaO) usualmente é escrito por completo.

### 2.3.1 - Reação de Formação do Clínquer

O clínquer é o elemento mais importante do cimento Portland, e é formado de quatro compostos básicos, a saber:

- Silicato dicálcico ( $2\text{CaOSiO}_2$ ) abreviada por  $\text{C}_2\text{S}$ , denominado belita;
- Silicato tricálcico ( $3\text{CaOSiO}_2$ ) abreviada por  $\text{C}_3\text{S}$ , denominado alita;
- Aluminato tricálcico ( $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ ), abreviada por  $\text{C}_3\text{A}$ ;
- Ferro Aluminato tetracálcico ( $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), abreviada por  $\text{C}_4\text{AF}$ .

Os óxidos que reagem para formação destes compostos são:  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e são provenientes das matérias-primas, que compõe o cru (farinha), por exemplo:

- Calcário fornece o  $\text{CaO}$ , sob a forma de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ );
- Areia fornece  $\text{SiO}_2$ ;
- Argila fornece  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e também  $\text{SiO}_2$ .

Outros componentes também podem ser encontrados na composição do cru, e por sua vez também no clínquer (Silva,1994). E por incorporação ao clínquer de alguns elementos presentes nas cinzas dos combustíveis utilizados, geralmente são encontrados:  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ . Elementos traços também podem ser encontrados tanto no cru como no clínquer (Silva, 1994).

As reações e transformações do cru para obter o clínquer são:

- Evaporação da água livre residual até  $150\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Evaporação da água de combinação das argilas, entre  $150\text{ }^\circ\text{C}$  a  $600\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- Decomposição do carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ) entre  $400\text{ }^\circ\text{C}$  a  $500\text{ }^\circ\text{C}$ , Eq. (2.2):

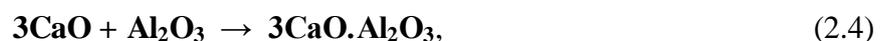


- Descarbonatação, entre  $800$  a  $950\text{ }^\circ\text{C}$ , reação fortemente endotérmica, Eq. (2.3):



- Formação da fase líquida entre  $1200$  a  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ , Eq. (2.4) e Eq. (2.5):

Aluminato tricálcico, ( $\text{C}_3\text{A}$ )



Ferro aluminato tetracálcico ( $C_4AF$ )



- Formação do Silicato Dicálcico (belita,  $C_2S$ ) entre 1250 °C a 1300 °C, Eq. (2.6):



- Formação do Silicato Tricálcico (alita,  $C_3S$ ) entre 1350 °C a 1450 °C, Eq. (2.7):



A farinha, após passar pela reação de calcinação entre 800 a 900 °C continua sendo aquecido para atingir as temperaturas necessárias para ocorrerem às reações de formação dos componentes intermediários. Entre 1200 a 1300 °C ocorre a formação de uma fase líquida quaternária, de composição fechada, a qual tem a forma C – S – A – F, no diagrama de fase. A quantidade de líquido formado é função da quantidade de A e F presente no material e da temperatura do forno (Ghosh, 1983 apud Silva, 1994). A Tabela 2.1 mostra os níveis de temperaturas nos quais ocorrem as reações de formação do clínquer anteriormente citados, e a Tabela 2.2 apresenta os respectivos calores de reação segundo Weber (1963).

Tabela 2.1 Temperatura de reação dos compostos do clínquer.

Acima de 800 °C	Início do processo de calcinação do $CaCO_3$ .
Entre 800 °C e 1200 °C	Formação de $C_2S$ .
Entre 1095 °C e 1205 °C	Formação de $C_3A$ e $C_4AF$ .
De 1260 °C até 1455 °C	Formação de $C_3S$ a partir do $C_2S$ com quase extinção da cal livre ( $CaO$ ).
De 1455 °C a 1300 °C	Cristalização da fase líquida do $C_3A$ e $C_4AF$ . Os silicatos $C_2S$ e $C_3S$ praticamente não sofrem modificações tanto na forma como na composição.

Fonte: (Bye, 1983 e Ghosh, 1983 apud Silva, 1994).

Tabela 2.2 Calor de reação dos componentes de formação do clínquer.

REAÇÕES	Calor de reação (a 20 °C)	Reação
$\text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	1766 kJ/kg	endotérmica
$\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$	1188 kJ/kg	endotérmica
$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ( $\beta\text{-C}_2\text{S}$ )	717 kJ/kg	exotérmica
$3\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ( $\text{C}_3\text{S}$ )	528 kJ/kg	exotérmica
$\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (CA)	309 kJ/kg	exotérmica
$12\text{CaO} + 7\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 12\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ( $\text{C}_{12}\text{A}_7$ )	169 kJ/kg	exotérmica
$3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ( $\text{C}_3\text{A}$ )	15 kJ/kg	exotérmica
$4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ( $\text{C}_4\text{AF}$ )	84 kJ/kg	exotérmica

Fonte: (Weber, 1963 apud Silva, 1994).

A descarbonatação do  $\text{CaCO}_3$  é uma reação fortemente endotérmica e é uma das principais do processo de formação do clínquer, consome a maior parte do calor fornecido ao processo, cerca de 1766 kJ/kg (Weber, 1963) é extremamente importante que o material esteja totalmente calcinado antes de entrar na zona de clinquerização.

Nos fornos sem pré-aquecedores de ciclones e pré-calcinador, a calcinação ocorre dentro do forno. Nos sistemas com pré-aquecedores de ciclones, aproximadamente 60 % da calcinação ocorre antes do forno rotativo e nos sistemas equipados com pré-aquecedores de ciclones e pré-calcinadores, aproximadamente 94 % da calcinação ocorre antes do forno rotativo. Dentro do forno rotativo existe uma zona de transição que se divide em zona fria e zona quente com a temperatura variando entre 950 °C a 1300 °C. Com a calcinação totalmente completada o material continua sendo aquecido até atingir as temperaturas das demais reações, aproximadamente 1450 °C.

No processo via úmida à formação do clínquer se dá ao longo do comprimento do forno rotativo, passando por diferentes zonas: **secagem da farinha** → **pré-aquecimento** → **calcinação** → **clinquerização** → **resfriamento**. Os limites destas zonas dependem da temperatura e das reações químicas que ocorrem no material (Duarte, 1999). A Figura 2.21 mostra as várias zonas deste processo.

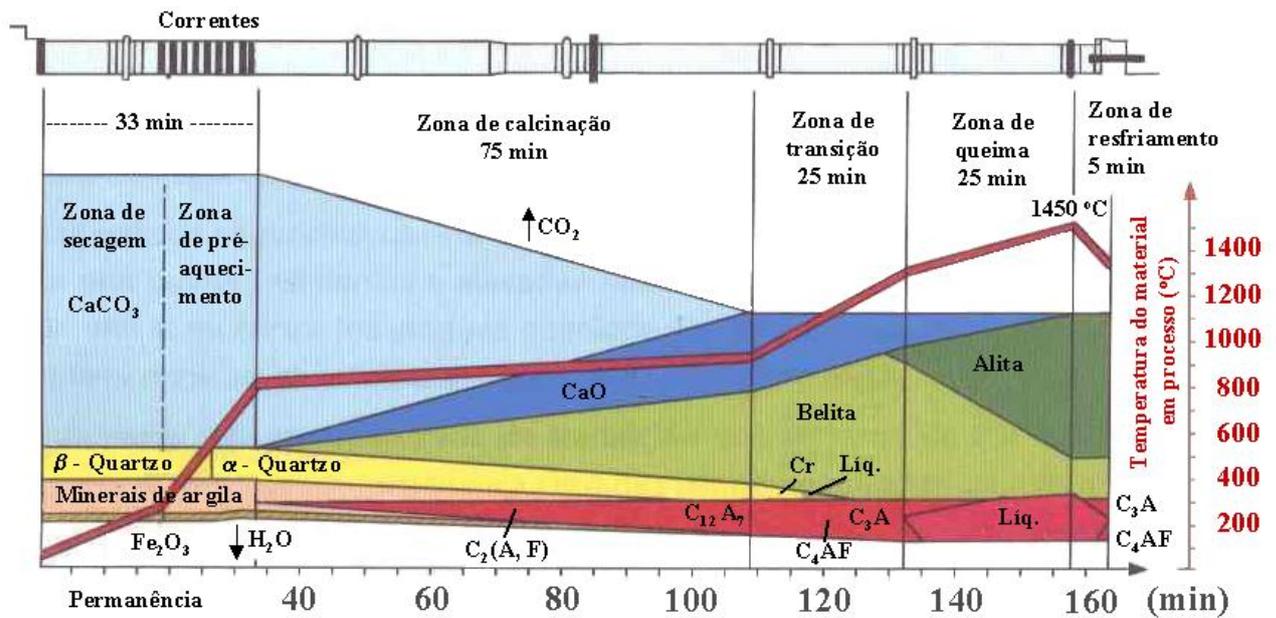


Figura 2.21 – Identificação das zonas de um forno rotativo de via úmida.  
Fonte: Duarte, 1999.

No processo via seca, utiliza-se um forno com pré-aquecedor que não possui as zonas de secagem e de pré-aquecimento. Neste caso, o próprio pré-aquecedor se encarrega de secar e pré-aquecer o material até a temperatura inicial da calcinação. Assim, a calcinação é iniciada na entrada do forno rotativo, iniciando a primeira zona de calcinação, como mostra a Figura 2.22.

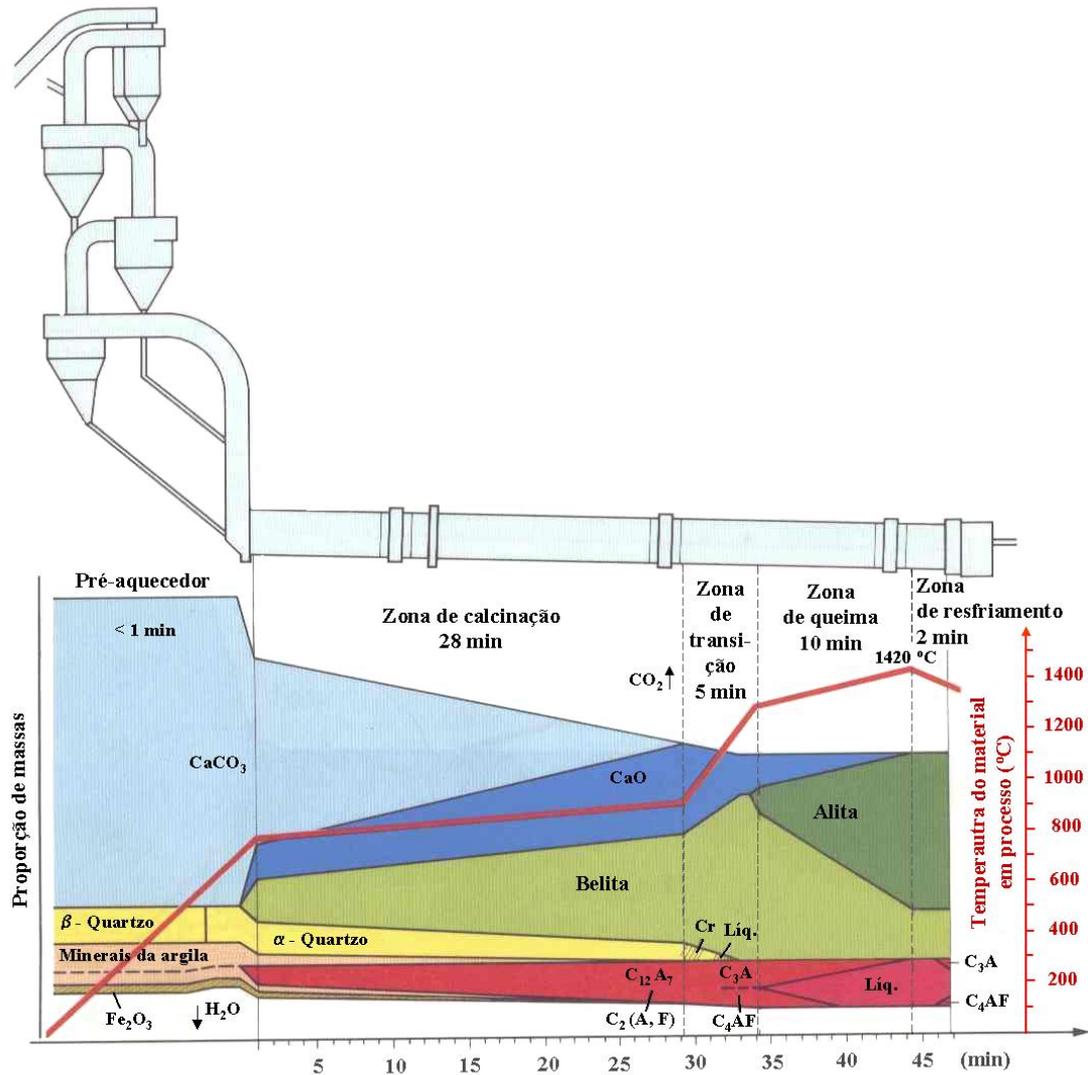


Figura 2.22 Identificação das zonas de um forno rotativo de via seca com pré-aquecedor.  
Fonte: DUARTE, 1999.

### 2.3.2 - Módulos de Controle da Mistura

A determinação da porcentagem de cada componente para composição da farinha depende essencialmente da composição química das matérias-primas e da composição que se deseja para o clínquer. O efeito sobre a queima dos óxidos CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> depende das relações de teores entre os mesmos. Estas relações são definidas pelos Módulos de Controle da Mistura. Os mais utilizados são: Módulo de Sílica, Módulo de Alumina e Fator de Saturação de Cal.

### 2.3.2.1 - Módulo de sílica (MS)

O módulo de sílica relaciona a concentração de  $\text{SiO}_2$  com a soma das concentrações de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Onde, os valores dos compostos são dados em percentagem em relação ao peso na composição do cru. Sendo definido pela Equação (2.8):

$$MS = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (2.8)$$

Ou seja, é a relação de materiais não fundentes (silicatos) e materiais fundentes.

Exemplo: A composição típica de um clínquer é:

67% de  $\text{CaO}$ , 22% de  $\text{SiO}_2$ , 5% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 3% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e 3% de outros óxidos.

Para este clínquer o Módulo de Sílica é:

$$MS = \frac{22}{5 + 3} = 2,7$$

Para clínquer fabricados no Brasil, MS varia de 1,7 a 3,1 (ABCP, 1984).

O aumento de MS dificulta a queima, necessitando de maior fornecimento de calor e maior temperatura na zona clinquerização, conseqüentemente maior consumo de combustível (Peray and Waddell, 1972 apud Silva, 1994). Isto acontece devido à presença de materiais não fundentes no cru.

O aumento de MS provoca um aumento na proporção de  $\text{C}_2\text{S}$  e  $\text{C}_3\text{S}$  e uma diminuição na quantidade de  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ .

O MS baixo aumenta a fase líquida e a formação de colagens, beneficiando a queima.

### 2.3.2.2 - Módulo de alumina (MA)

O módulo de alumina relaciona a concentração de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Onde, os valores dos compostos são dados em percentagem em relação ao peso na composição do cru. Sendo definido pela Equação (2.9):

$$MA = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (2.9)$$

Ou seja, é a relação entre os dois principais materiais fundentes.

Exemplo: considerando composição típica do clínquer anterior, temos:

$$MA = \frac{5}{3} = 1,7$$

Para o clínquer fabricados no Brasil, MA varia de 1,2 a 3,2 (ABCP, 1984).

E os valores considerados ótimos, estão entre:  $1,3 \leq MA \leq 1,6$

O MA baixo torna a fase líquida menos viscosa, facilita as cinéticas das reações e melhora a granulação do clínquer.

O MA alto, aumenta a proporção de  $C_3A$ , aumenta a viscosidade da fase líquida, dificultando a cinética das reações químicas.

### 2.3.2.3 - Fator de saturação de cal (FSC)

O fator de saturação de Cal, relaciona a concentração de CaO presente no cru/clínquer com os demais compostos com os quais reage. Onde, os valores dos compostos são dados em percentagem em relação ao peso na composição do cru. Sendo (FSC) coeficiente adimensional expresso em % e definido pela Equação (2.10):

$$FSC = \frac{100 \times CaO}{2,8 \cdot SiO_2 + 1,18 \cdot Al_2O_3 + 0,65 \cdot Fe_2O_3} \quad (2.10)$$

Exemplo: considerando composição típica do clínquer anterior, temos:

$$FSC = \frac{100 \times 67}{2,8 \times 22 + 1,18 \times 5 + 0,65 \times 3} = 96,47\%$$

Os valores considerados ótimos, estão entre  $90\% \leq FSC \leq 100\%$  (ABCP, 1984).

O FSC determina a quantidade máxima de óxido de cálcio que pode reagir com os outros óxidos, e o conteúdo da alita do clínquer. A Tabela 2.3 mostra os efeitos do fator de saturação de Cal no cru e no clínquer.

Tabela 2.3 - Efeitos do FSC no cru e no clínquer.

FSC alto	Cru difícil de queimar; maior consumo de combustível; cal livre alto
FSC baixo	Cru fácil de queimar; menos consumo de combustível; clínquer muito queimado
FSC alto	Clínquer de excelente qualidade ( $C_3S > 50\%$ ) alta resistência
FSC baixo	Clínquer de péssima qualidade ( $C_3S < 50\%$ ) baixa resistência

Fonte; (Swain 1995).

#### 2.3.2.4 - Módulo hidráulico (MH)

O módulo hidráulico tem uma relação similar ao FSC, porém não leva em conta os fatores de ponderação para os óxidos. Atualmente é pouco utilizado no Brasil. Valores de MH considerado bons se encontram entre 1,8 e 2,2 (Xirokostas e Zoppas, 1997 apud Carpio, 2005).

O módulo hidráulico é calculado pela Equação (2.11). Onde, os valores dos compostos são dados em percentagem em relação ao peso na composição do cru.

$$MH = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2.11)$$

Exemplo: considerando composição típica do clínquer anterior, temos:

$$MH = \frac{67}{22 + 5 + 3} = 2,23$$

## 2.4 - COMPOSIÇÃO TÍPICA DOS CIMENTOS

O clínquer é o elemento mais importante do cimento Portland, tem uma composição típica de 67% CaO, 22% SiO<sub>2</sub>, 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 3% de outros componentes menores, e normalmente contém quatro fases importantes, chamadas alita, belita, fase aluminato e fase ferrítica. Algumas outras fases, como sulfatos de álcalis e óxido de cálcio. São normalmente presentes em quantidades pequenas.

A alita é o silicato tricálcico (3CaOSiO<sub>2</sub>) abreviada por C<sub>3</sub>S, é o componente mais importante do clínquer, constitui 50 a 70% do seu peso. Modificado em sua estrutura cristalina e composição por incorporação de íons externos, especialmente Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> e Fe<sup>3+</sup> reage rapidamente com água, e em cimento Portland comum é o mais importante dos constituintes das fases para desenvolvimento de resistência do concreto em idades até 28 dias. (Taylor, 1992).

A belita é o silicato dicálcico (2CaOSiO<sub>2</sub>) abreviada por C<sub>2</sub>S, constitui 15 a 30% em peso do clínquer. Modificado por incorporação de íons externos, normalmente apresenta como polimorfô β. Está presente como o primeiro complexo de cal e sílica formado no aquecimento, sendo mais estável que o C<sub>3</sub>S, volta a se formar no resfriamento. Reage lentamente com a água, e portanto contribui pouco para a resistência do concreto durante os primeiros 28 dias. Mas contribui substancialmente para o acréscimo adicional de resistência que acontece em idades mais velhas. Perto de um ano, a resistência alcançada pela belita é sobre as mesmas condições comparáveis com a alita (Taylor, 1992).

Fase aluminato constitui 5-10% em peso da maioria dos clínqueres de cimento Portland comum. É o aluminato tricálcico (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) abreviada por C<sub>3</sub>A, substancialmente modificado em composição e algumas vezes também em sua estrutura por incorporação de íons externos. Especialmente Si<sup>4+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>. Este reage rapidamente com a água, e pode causar endurecimento rápido a menos que seja adicionado um reagente controlador do ponto de pega, usualmente o gesso.

Fase ferrítica compõe de 5-15% de clínquer de cimento Portland comum. A fase ferrítica é conhecida pelo ferro aluminato tetracálcico (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) abreviada por (C<sub>4</sub>AF) substancialmente modificada em composição por variação em relação Al/Fe e incorporação de íons externos. A taxa em que reage com a água parece ser um pouco variável, talvez devido a diferenças em composição ou outras características, mas em geral é

inicialmente alta e intermediária entre aquelas da alita e belita em idades mais avançadas (Taylor, 1992).

O clínquer é produzido por reações, em altas temperaturas, dos óxidos que compõe o cru. A clinquerização se dá a uma temperatura na ordem de 1460 °C e consiste de uma série de reações que a partir da mistura crua levam a formação dos constituintes principais do clínquer, a alita  $C_3S$ , a belita  $C_2S$ , o aluminato tricálcico  $C_3A$  e o ferro-aluminato tetracálcico  $C_4AF$ .

Nos Estados Unidos as indústrias utilizam como parâmetro as relações de Bogue, que fornecem um estimativa quantitativa da composição das fases que compõe o clínquer. Para utilizar as relações de Bogue devem ser feitas as seguintes considerações (Taylor, 1992):

- Assumir que as composições das quatro fases principais que compõe o clínquer são:  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ;
- Assumir que o  $Fe_2O_3$  ocorre somente como  $C_4AF$ ;
- Assumir que o  $Al_2O_3$  restante ocorre como  $C_3A$ ;
- Deduzir o teor  $CaO$  as quantidades de  $C_4AF$ ,  $C_3A$  e cal livre, com isso acha-se simultâneamente a solução de duas equações para os teores de  $C_3S$  e  $C_2S$ .

A composição típica destes componentes pode ser calculada assumindo estequiometria ideal e equilíbrio químico no forno através do cálculo potencial de Bogue (Bogue, 1952 apud Silva, 1994), cujas equações são:

$$C_3S = 4,07X_{CaO} - [(7,6X_{SiO_2}) + (6,72X_{Al_2O_3}) + (1,43X_{Fe_2O_3}) + (2,85X_{SO_3})] \quad (2.12)$$

$$C_2S = 2,87 \cdot X_{SiO_2} - 0,754 \cdot X_{C_3S} \quad (2.13)$$

$$C_3A = 2,65 \cdot X_{Al_2O_3} - 1,69 \cdot X_{Fe_2O_3} \quad (2.14)$$

$$C_4AF = 3,04 \cdot X_{Fe_2O_3} \quad (2.15)$$

A Tabela 2.4 mostra a composição típica dos compostos do clínquer calculado por este processo.

Tabela 2.4 Composição típica dos compostos do clínquer.

<b>Compostos do Clínquer</b>	<b>Faixa de Porcentagem(% em Peso)</b>
C <sub>2</sub> S - Silicato Dicálcico	15 – 45
C <sub>3</sub> S - Silicato Tricálcico	30 – 60
C <sub>3</sub> A - Aluminato Tricálcico	3 – 10
C <sub>4</sub> AF - Ferro Aluminato Tetracálcico	7 – 15
CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O - Sulfato de cálcio Hidratado	3 – 5

Fonte: (Beuer, 1986 apud Silva, 1994)

As relações de Bogue fornecem apenas uma estimativa das quantidades relativas das fases presentes, pois na prática é muito difícil atingir o equilíbrio durante o resfriamento, observa-se que as fases formadas não apresentam as proporções previstas, estando subestimada a quantidade de alita e superestimada a belita (Taylor, 1992).

No clínquer, as reações ocorrem no estado sólido e são governadas pelo fenômeno de difusão iônica entre os sólidos. Esta difusão tem sua velocidade aumentada com o aparecimento da fase líquida, constituída pelas fases C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF, localizada na interface dos grãos e que começa a se formar à temperatura próxima de 1300°C. A velocidade de difusão e, a facilidade de clinquerização está relacionada à quantidade e à viscosidade da fase líquida. O resfriamento do clínquer é uma das fases mais importantes da sua formação, pois dele depende a estabilidade, a decomposição dos cristais de alita, a formação da belita secundária, o conteúdo de cal livre secundária e a formação do aluminato cálcico, sendo que estes dois últimos componentes condicionam os fenômenos de expansão no cimento.

Segundo foi demonstrado por (Taylor, 1992), em temperaturas abaixo de 1250 °C ocorre a decomposição do C<sub>3</sub>S formando o (C<sub>2</sub>S) e CaO livre. Ele mostrou que essa reação é reversível, demonstrando assim a existência de um verdadeiro limite de estabilidade, isto é abaixo de 1250°C ocorre a decomposição. Na produção do clínquer é necessário se atingir temperaturas muito acima de 1250°C para se produzir o C<sub>3</sub>S, da ordem de 1450 °C devido à cinética de formação das fases (Taylor, 1992).

Os cristais de CaO livre podem ser encontrados no clínquer por deficiência dos processos de fabricação. São sempre encontrados sob a forma de cristais arredondados e sempre associados à alita e a fase líquida. Geralmente, não coexistem com o C<sub>2</sub>S, pois uma combinação entre ambos ocorreria formando o C<sub>3</sub>S. A única exceção ocorre na transformação do C<sub>3</sub>S em C<sub>2</sub>S e CaO livre secundário, isto é, a decomposição de uma fase instável a

temperaturas mais baixas. Isto ocorre quando a velocidade de resfriamento do clínquer é realizada de forma lenta (Taylor, 1992). O resfriamento é a solidificação da fase líquida obtida no forno de clínquer. De acordo com a velocidade de resfriamento, a solidificação pode ocorrer de três maneiras: Na primeira, em resfriamentos lentos, o equilíbrio entre a fase líquida e a fase sólida é mantido continuamente, isso possibilita a transferência de material entre as fases, ocasionando um tempo mais longo desta fase líquida neste estado. Na segunda, em resfriamentos com velocidades intermediárias, não ocorre a cristalização da fase líquida, mas sim a formação de uma fase amorfa. Na terceira, em resfriamentos rápidos, a cristalização da fase líquida se dá independentemente, sem interagir com a fase sólida sempre presente (Taylor, 1992).

O ferro aluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) não tem uma estequiometria exata, sendo uma solução sólida entre os óxidos de cálcio (C), aluminato (A) e o ferro (F), de modo que sua composição pode variar entre  $C_6A_2F$  e  $C_6AF_2$ , por isto, o  $C_4AF$  é conhecido como fase ferrítica, a qual é responsável pela coloração do cimento (Silva, 1994). Quando a fase ferrítica contém óxido de magnésio (MgO), o clínquer torna-se escuro, resultando um cimento de cor cinzenta. Caso o conteúdo de MgO for baixo, ou a fase ferrítica contiver quantidade apreciável de ferro, o cimento poderá adquirir uma tonalidade marrom.

## 2.5 - TIPOS E CLASSIFICAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

Os cimentos podem ser classificados de várias maneiras, sendo a mais utilizada a da ASTM (American Society for Testing and Materials). As classificações dos cimentos são baseadas em grande parte na performance e na composição química, embora em cimentos comuns, um mesmo tipo pode possuir várias composições similares (ASTM, 1978, Mehta, 1977 apud Silva, 1994).

A Tabela 2.5 mostra a composição típica para cimentos Portland segundo a classificação ASTM.

Tabela 2.5 – Composição típica para cimento Portland, segundo a ASTM.

TIPO	DESCRIÇÃO	C <sub>3</sub> S %	C <sub>2</sub> S %	C <sub>3</sub> A %	C <sub>4</sub> AF %	CSH <sub>2</sub> %
I	Uso Geral	55	20	10	7	5
II	Moderada Resistência a Sulfatos	45	30	7	12	4
III	Alta Resistência Inicial	60	15	10	7	5
IV	Baixo calor de Hidratação	30	45	5	12	3
V	Resistente aos Sulfatos	40	35	3	15	3

Fonte: Silva (1994).

A Tabela 2.6 mostra a composição química percentual em massa, típica de um cimento Portland. Calculada pelas equações de Bogue.

Tabela 2.6 Composição química percentual em massa, típica de um cimento Portland.

Composto Químico	Porcentagem em peso	Fórmula Química	Fórmula Química Notação Ind. Cimento
Silicato tricálcico	50 %	3CaO·SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Silicato dicálcico	25 %	2CaO·SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Aluminato tricálcico	10 %	3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Ferroaluminato tetracálcico	10 %	4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF
Sulfato de Cálcio Hidratado	5 %	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	CSH <sub>2</sub>

Fonte: Silva (1994).

### 2.5.1 - Tipos de Cimento Portland Fabricados no Brasil

As composições das matérias-primas que vão constituir os diversos tipos de cimento Portland não podem ser feitas atendendo simplesmente a vontade unilateral de um determinado produtor ou de um usuário. É necessário normalizar cada tipo de cimento a ser produzido. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) prepara e divulga normas técnicas que são usadas no mercado como padrão de referência. As normas técnicas definem não somente as características e propriedades mínimas que os cimentos Portland devem apresentar, mas também, os métodos de ensaio empregados para verificar se esses cimentos atendem às exigências das respectivas normas. Quando um saco de cimento apresenta o Selo de Qualidade, isto significa que o produto nele contido foi produzido em conformidade com as normas técnicas brasileiras e atende as exigências dessas normas. O

Selo é um certificado de garantia de que o produto apresenta as características e propriedades exigidas pelas normas técnicas em vigor. O consumidor tem todo o direito de verificar se o cimento que comprou cumpre as normas técnicas brasileiras. Entretanto, terá de fazer essa verificação com base nos métodos de ensaio fixados por essas normas.

No Brasil são produzidos vários tipos de cimento Portland, diferenciados entre si, principalmente em função de sua composição. Os mais empregados nas obras de construção civil são:

- Cimento Portland Comum;
- Cimento Portland Composto;
- Cimento Portland de Alto-forno;
- Cimento Portland Pozolânico.

Em menor escala é produzido para aplicações especiais os seguintes tipos:

- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial;
- Cimento Portland Resistente aos Sulfatos;
- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação;
- Cimento Portland Branco;
- Cimento para Poços Petrolíferos.

Todos os tipos de cimento mencionados são regidos por normas da ABNT.

## **2.5.2 - Cimentos Portland Comuns e Cimentos Portland Compostos**

O primeiro cimento Portland produzido no Brasil foi o do Tipo Comum, isto é, um cimento com 97 % de clínquer e 3 % de gesso, sem quaisquer adições ativas, cuja sigla de identificação era CP, correspondente ao atual CPI. Ele acabou sendo considerado na maioria das aplicações usuais como termo de referência para comparação com as características e propriedades dos tipos de cimento posteriormente produzidos. Foi a partir do amplo domínio científico e tecnológico sobre o CP que foi possível desenvolver outros tipos de cimentos, com objetivo inicial de atender aplicações especiais.

A partir de 1991 o Brasil passou a produzir um novo tipo de cimento, o cimento Portland composto, cuja composição é intermediária entre os cimentos Portland comuns e os

cimentos Portland com adições ativas. A Tabela 2.7 apresenta a composição dos cimentos Portland comuns e compostos.

Tabela 2.7 Composição dos cimentos Portland comuns e compostos

Tipo de cimento	Sigla	Classes Resistência MPa	Composição (% em massa)				Norma ABNT
			Clínquer + Gesso	Escória de alto-forno	Material Pozolânico	Material Fíler	
Comum	CPI	25 32 40	100	0			NBR 5732
	CPI-S		95 - 99	1 - 5			
Composto	CP II-E	25 32 40	56 - 94	6 - 34	0	0 - 10	NBR 11578
	CP II-Z	25 32 40	76 - 94	0	6 - 14	0 - 10	
	CP II-F	25 32 40	90 - 94	0	0	6 - 10	

Fonte: ABNT

Atualmente no Brasil o cimento Portland comum é o mais utilizado pela construção civil, respondendo por 75 % do total da produção industrial brasileira.

### 2.5.3 - Cimento Portland de Alto-forno

O consumo intensivo de energia durante o processo de fabricação de cimento motivou pesquisas em todo o mundo na busca, de medidas para diminuição do consumo energético. Uma das alternativas encontrada foi o uso de escórias granuladas de alto-forno na composição de um novo tipo de cimento denominado Cimento Portland de Alto-Forno. As escórias granuladas de alto-forno apresentam propriedades hidráulicas latentes, isto é, da forma como são obtidas nas siderúrgicas endurecem quando misturadas com água. Entretanto, as reações de hidratação das escórias são tão lentas que limitariam sua aplicação prática se agentes ativadores, químicos e físicos, não acelerassem o processo de hidratação. A cal liberada durante a hidratação do clínquer é o principal ativador químico da escória quando esta é adicionada ao cimento, ao passo que a ativação física é conseguida pela granulometria mais fina quando a escória é moída. De acordo com a NBR 5735, a adição de escória de alto-forno na composição do cimento Portland de Alto-forno pode chegar até 70 % em massa, sendo que o restante é composto de 25 % de clínquer mais gesso e 5 % de carbonato de cálcio.

## 2.5.4 - Cimento Portland Pozolânico

Uma alternativa encontrada pelos pesquisadores para diminuição do consumo energético e melhoria das propriedades do cimento foi à adição de materiais pozolânicos ao clínquer, resultando em um novo produto, o Cimento Portland Pozolânico. Os materiais pozolânicos não reagem com a água da forma como são obtidos. Entretanto, quando finamente moídos, reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água e na temperatura ambiente, dando origem os compostos com propriedades aglomerantes. Por essa razão, os materiais pozolânicos podem ser misturados ao clínquer, pois o hidróxido de cálcio é um produto normalmente resultante da hidratação do clínquer. Os materiais pozolânicos podem ser obtidos pela britagem de certos tipos de rochas, pelo beneficiamento de pozolanas naturais, pela calcinação de certos tipos de argilas, pelas cinzas volantes originadas da queima de materiais ricos em sílica como carvão mineral, palha de arroz, etc.

Este tipo de cimento apresenta baixo calor de hidratação, modifica a microestrutura do concreto, diminuindo a permeabilidade, a difusibilidade iônica e as porosidades capilares, aumentando a estabilidade e a durabilidade das estruturas de concreto armado. Melhora também seu desempenho ao ataque de sulfatos e da reação álcali-agregado, aumenta a resistência à compressão em idades avançadas e melhora a trabalhabilidade do concreto.

A NBR 5736 permite a adição de até 50 % de material pozolânico em massa, sendo que o restante é composto de 45 % de clínquer mais gesso e 5 % de carbonato de cálcio.

A Tabela 2.8 apresenta a composição dos cimentos Portland de alto-forno e pozolânicos.

Tabela 2.8 - Composição dos cimentos Portland de alto-forno e cimentos Portland Pozolânico.

Tipo de cimento	Sigla	Classes Resistência (MPa)	Composição (% em massa)				Norma ABNT
			Clínquer + Gesso	Escória de alto-forno	Material Pozolânico	Material Carbonático (Fíler)	
Alto-forno	CP III	25 32 40	25 - 65	35 - 70	0	0 - 5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	25 32 40	45 - 85	0	15-50	0-5	NBR 5737

Fonte: ABNT

## 2.5.5 - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)

O cimento Portland de alta resistência inicial (designado pela sigla CP V-ARI) tem a peculiaridade de atingir alta resistência já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer para conseguir um teor de 60 % de silicato tricálcico, bem como pela moagem mais fina do cimento para aumentar a área de contatos das partículas, de modo que, ao reagir com a água, o cimento adquira elevadas resistências, com maior velocidade. Este tipo de cimento é usado em obras que exijam que o concreto adquira alta resistência algumas horas após sua aplicação, geralmente quando necessita de uma desforma rápida. A Tabela 2.9 apresenta a composição desse tipo de cimento.

Tabela 2.9 Composição do cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI).

Tipo de cimento	Sigla	Classes Resistência (MPa)	Composição (% em massa)				Norma ABNT
			Clínquer + Gesso	Escória de alto-forno	Material pozolânico	Material Fíler	
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	-	95 - 100	0	0	0 - 5	NBR 5733

Fonte: ABNT

## 2.5.6 - Cimento Portland Resistente aos Sulfatos

Os cimentos Portland resistentes aos sulfatos são aqueles que têm a propriedade de oferecer resistência aos meios agressivos sulfatados, tais como, os encontrados nas redes de esgotos de águas servidas ou industriais, na água do mar e em alguns tipos de solos. De acordo com a norma NBR 5737, quaisquer uns dos cinco tipos básicos (CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V-ARI) podem ser considerados resistentes aos sulfatos, desde que obedeça a pelo menos uma das seguintes condições:

- a) teor de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) do clínquer seja no máximo 8 % em massa;
- b) teor de adições carbonáticas seja no máximo 5% em massa;
- c) cimentos do tipo alto-forno (CP III) que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa;
- d) cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em peso;

- e) cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

Observações:

- No item (a) e (e), o cimento deve atender ainda a uma das seguintes normas: NBR 5732, NBR 5733, NBR 5735, NBR 5736 e NBR 11578.
- Se o cimento original for o Portland de alta resistência inicial (NBR 5733), admite-se a adição de escória granulada de alto-forno ou de materiais pozolânicos, para os fins específicos da NBR 5737.
- Para obras construídas em meios agressivos sulfatados, é altamente aconselhável submeter o cimento a ensaios específicos de determinação da resistência aos sulfatos antes de uma decisão sobre sua utilização.

Os testes usuais são:

- **ASTM C-1012** - Length Change of Hidraulic - Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, com mínimo de 180 dias de duração.
- **NBR 13583** – Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio, com duração de 66 dias.
- Método proposto por Koch & Steinegger, com duração de 77 dias.

### **2.5.7 - Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação**

O aumento da temperatura no interior de grandes estruturas de concreto devido ao calor desenvolvido durante a hidratação do cimento geralmente leva ao aparecimento de fissuras de origem térmica, que podem ser evitadas se forem usados cimentos com taxas lentas de evolução de calor, os chamados cimentos Portland de baixo calor de hidratação. Os cimentos Portland de baixo calor de hidratação, de acordo com a NBR 13116, são aqueles que geram até 260 J/g aos 3 dias de hidratação e no máximo 300 J/g aos 7 dias de hidratação e podem ser qualquer um dos tipos básicos normalizados pela ABNT, desde que atendam estas especificações. O ensaio é executado de acordo com a norma NBR 12006 - Determinação do Calor de Hidratação pelo Método da Garrafa de Langavant.

## 2.5.8 - Cimento Portland Branco

O cimento Portland branco é um tipo de cimento que se diferencia dos demais pela coloração. A cor branca é conseguida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxidos de ferro e manganês e por condições especiais durante a fabricação, especialmente com relação ao resfriamento e à moagem do produto. No Brasil o cimento Portland branco é regulamentado pela norma NBR 12989, sendo classificado em dois subtipos: Cimento Portland Branco Estrutural e Cimento Portland Branco não Estrutural. O Cimento Portland Branco Estrutural é aplicado em concretos brancos para fins arquitetônicos, possuindo as classes de resistência de 25, 32 e 40 MPa, similares às dos outros tipos de cimento normalizados pela ABNT. Já o Cimento Portland Branco não Estrutural não tem indicação de classe e é aplicado, por exemplo, no rejuntamento de azulejos e na fabricação de ladrilhos hidráulicos, isto é, em aplicações não estruturais, sendo esse aspecto ressaltado na embalagem para evitar uso indevido do produto. A Tabela 2.10 mostra a composição dos Cimentos Portland Branco.

Tabela 2.10 Composição dos cimentos Portland branco.

Tipo de cimento	Sigla	Classe de Resistência MPa	Composição (% em massa)				NORMA ABNT
			Clínquer branco +gesso	Escória de Alto-forno	Material Pozolânico	Material Carbonático	
Branco estrutural	CPB	25 – 32 - 40	100 – 75	0	0	0 - 25	NBR 12989
Branco não Estrutural	CPB	---	74 - 50	0	0	26 - 50	

Fonte: ABNT

## 2.5.9 - Cimento Portland para Poços Petrolíferos (CPP)

O cimento Portland para poços petrolíferos constitui um tipo de cimento Portland de aplicação bastante específica, ou seja, para cimentação de poços petrolíferos. O consumo desse tipo de cimento é pouco expressivo quando comparado ao dos outros tipos de cimentos normalizados no País. O cimento para poços petrolíferos (CPP) é regulamentado pela NBR 9831 e na sua composição não se observam outros componentes além do clínquer e do gesso para retardar o tempo de pega. No processo de fabricação do cimento para poços petrolíferos são tomadas precauções para garantir que o produto conserve as propriedades reológicas

necessárias nas condições de pressão e temperatura elevadas presentes a grandes profundidades, durante a aplicação nos poços petrolíferos.

### **2.5.10 - Prescrições Normativas**

Os vários tipos de cimento normalizados pela ABNT são designados pela sigla e pela classe de resistência a compressão. As siglas correspondem ao prefixo CP acrescido dos algarismos romanos I, II, III, IV e V, conforme o tipo do cimento, sendo as classes indicadas pelos números 25, 32 e 40. As classes de resistência apontam os valores mínimos de resistência à compressão em mega pascal (MPa), após 28 dias de cura. A determinação da resistência à compressão deve ser feita por um método de ensaio normalizado pela NBR 7215 Este método consiste em preparar, sob condições padronizadas de laboratório, uma argamassa com a proporção em massa de uma parte de cimento para três partes de areia e relação água/cimento igual a 0,48. São moldados doze corpos de prova em cilíndricos de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, que serão ensaiados da seguinte forma:

- Para o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), as idades de cura são 1, 3 e 7 dias .

Quatro corpos-de-prova padronizados serão ensaiados em uma máquina de compressão após o primeiro dia de enchimento, quatro após o terceiro e quatro após o sétimo dia.

- Para os demais tipos de cimento Portland, as idades de cura são 3, 7 e 28 dias .

Quatro corpos-de-prova padronizados serão ensaiados em máquina de compressão após o terceiro dia de enchimento, quatro após o sétimo e quatro após vigésimo oitavo dia.

A Figura 2.3 mostra a evolução média de resistência dos principais tipos de cimento Portland, com base nos valores experimentais obtidos nos laboratórios da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP.)

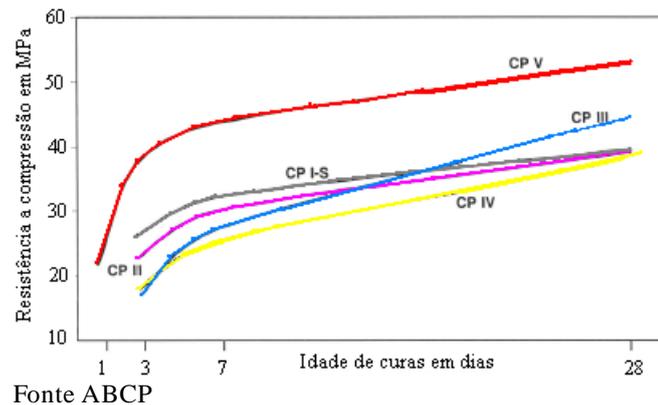


Figura 2.23 Evolução média de resistência à compressão dos cimentos CP.

As normas técnicas da ABNT referentes aos tipos apresentados na Tabela 2.11 fixam as condições exigíveis desses cimentos, tais como designação, composição, exigências químicas, físicas e mecânicas, condições de embalagem, marcação, entrega e armazenamento dos sacos de cimento, bem como critérios de aceitação e rejeição do produto.

## 2.6 - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS E MECÂNICAS DOS CIMENTOS PORTLAND

Para verificação das propriedades físico-químicas e mecânicas dos cimentos são realizados vários tipos de ensaios, padronizados por normas, para comprovar as qualidades dos produtos finais. As Tabelas 2.12, 2.13 e 2.14 apresentam os limites estabelecidos de exigências físicas, mecânicas e químicas, para os diferentes tipos de cimento, segundo as normas da ABNT. As exigências químicas visam limitar o teor de adições, a pré-hidratação e falhas no processo de fabricação, enquanto que as exigências físicas e mecânicas garantem o desempenho mecânico e reológico quando da aplicação do cimento em argamassas e concretos.

Tabela 2.11 Nomenclatura dos cimentos Portland normalizados pela ABNT.

Nome técnico		Sigla	Classe	Identificação do tipo e classe
Cimento Portland Comum <b>NBR 5732</b>	Cimento Portland Comum	<b>CP I</b>	25	<b>CP I - 25</b>
			32	<b>CP I - 32</b>
			40	<b>CP I - 40</b>
	Cimento Portland Comum com adição	<b>CP I - S</b>	25	<b>CP I - S - 25</b>
			32	<b>CP I - S - 32</b>
			40	<b>CP I - S - 40</b>
Cimento Portland Composto <b>NBR 11578</b>	Cimento Portland Composto com escória	<b>CP II - E</b>	25	<b>CP II - E - 25</b>
			32	<b>CP II - E - 32</b>
			40	<b>CP II - E - 40</b>
	Cimento Portland Composto com Pozolana	<b>CP II - Z</b>	25	<b>CP II - Z - 25</b>
			32	<b>CP II - Z - 32</b>
			40	<b>CP II - Z - 40</b>
	Cimento Portland Composto com fíler	<b>CP II - F</b>	25	<b>CP II - F - 25</b>
			32	<b>CP II - F - 32</b>
			40	<b>CP II - F - 40</b>
Cimento Portland de Alto-forno <b>NBR 5735</b>		<b>CP III</b>	25	<b>CP III - 25</b>
			32	<b>CP III - 32</b>
			40	<b>CP III - 40</b>
Cimento Portland Pozolânico <b>NBR 5736</b>		<b>CP IV</b>	25	<b>CP IV - 25</b>
			32	<b>CP IV - 32</b>
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial <b>NBR 5733</b>		<b>CP V - ARI</b>	---	<b>CP V - ARI</b>
Cimento Portland Resistente aos Sulfatos <b>NBR 5737</b>		---	25 32 40	Sigla e classe dos tipos originais Acrescidos do sufixo <b>RS</b> .Exemplo: <b>CP I – 32RS, CP II – 32RS</b>
Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação <b>NBR 13116</b>		-	25 32 40	Sigla e classe dos tipos originais Acrescidos do sufixo <b>BC</b> .Exemplo: <b>CP I – 32BC, CP II – F – 32BC</b>
Cimento Portland Branco <b>NBR 12989</b>	Cimento Portland Branco Estrutural	<b>CPB</b>	25	<b>CPB - 25</b>
			32	<b>CPB - 32</b>
	Cimento Portland Branco Não Estrutural	<b>CPB</b>	-	<b>CPB</b>
Cimento Portland para Poços Petrolíferos <b>NBR 9831</b>		<b>CPP</b>	G	<b>CPP - classe G</b>

Fonte: ABNT

Tabela 2.12 - Características físicas

Tipos		Finura		Tempo de pega		Expansibilidade	
		# 200 (75 um)	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Início (min)	Fim (min)	A Frio (mm)	A quente (mm)
■	CP I	≤12,0	≈ 2400	≈ 1	≈ 10	≈5,0	≈ 5,0
■	CP I-S	≤12,0 ≤10,0	≈ 2600 ≈ 2800				
■	CP II-E	≤12,0	≈ 2400	≈ 1	≈ 10	≈5,0	≈ 5,0
■	CP II-Z	≤12,0	≈ 2600				
■	CP II-F	≤10,0	≈ 2800				
■	CP III	≤8,0	-	≈ 1	≈ 12	≈5,0	≈ 5,0
■	CP IV	≤8,0	-	≈ 1	≈ 12	≈5,0	≈ 5,0
■	CP V-ARI	≤6,0	≈ 3000	≈ 1	≈ 10	≈5,0	≈ 5,0
■	CP V-ARI-RS	≤6,0	≈ 3000	≈ 1	≈ 10	≈5,0	≈ 5,0

Fonte: ABNT

Tabela 2.13 - Características mecânicas.

Tipos		Resistência à compressão			
		1 Dia (MPa)	3 Dias (MPa)	7 Dias (MPa)	28 Dias (MPa)
■	CP I	---	≈ 8,0	≈ 15,0	≈ 25,0
■	CP I-S		≈ 10,0 ≈ 15,0	≈ 20,0 ≈ 25,0	≈ 32,0 ≈ 40,0
■	CP II-E	---	≈ 8,0	≈ 15,0	≈ 25,0
■	CP II-Z		≈ 10,0	≈ 20,0	≈ 32,0
■	CP II-F		≈ 15,0	≈ 25,0	≈ 40,0
■	CP III	---	≈ 8,0 ≈ 10,0 ≈ 12,0	≈ 15,0 ≈ 20,0 ≈ 23,0	≈ 25,0 ≈ 32,0 ≈ 40,0
■	CP IV		≈ 8,0 ≈ 10,0	≈ 15,0 ≈ 20,0	≈ 25,0 ≈ 32,0
■	CP V-ARI		≈ 14,0	≈ 24,0	≈ 34,0
■	CP V-ARI-RS	≈ 11,0	≈ 24,0	≈ 34,0	-

Fonte: ABNT

Tabela 2.14- Características químicas

Tipos		Resíduo insolúvel (%)	Perda ao fogo (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)
■	CP I	≤1,0	≤2,0	≤6,5	≤4,0	≤1,0
■	CP I-S	≤5,0	≤4,5	≤6,5	≤4,0	≤3,0
■	CP II-E	≤2,5	≤6,5	≤6,5	≤4,0	≤5,0
■	CP II-Z	≤16,0	≤6,5	≤6,5	≤4,0	≤5,0
■	CP II-F	≤2,5	≤6,5	≤6,5	≤4,0	≤5,0
■	CP III	≤1,5	≤4,5	---	≤4,0	≤3,0
■	CP IV	---	≤4,5	≤6,5	≤4,0	≤3,0
■	CP V-ARI	≤1,0	≤4,5	≤6,5	**	≤3,0
■	CP V-ARI-RS	---	≤4,5	≤6,5	**	≤3,0

Fonte: ABNT

Observações:

1. A atividade pozolânica do cimento, determinada conforme a NBR 5753, deve ser positiva.
2. A atividade do material pozolânico, determinada conforme a NBR 5752, deve ser maior que 75%.
3. O teor de material pozolânico deve ser determinado pelo ensaio de resíduo insolúvel.
4. O teor de SO<sub>3</sub> igual a 3,5% aplica-se quando C<sub>3</sub>A ≤ 8,0, e 4,5% quando C<sub>3</sub>A ≥ 8,0%.

## 2.7 - PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

O cimento é um dos mais importantes materiais a serviço da construção civil. É o único produto que está presente em todas as etapas da obra, além de ser o material de construção de maior uso no mundo. Segundo Chatterjee (1993) é o principal produto, em quantidade, fabricado industrialmente pelo homem, sendo sua indústria a quarta maior consumidora de energia no mundo (Benoit e Hamel, 1993).

### 2.7.1 - Produção Mundial de Cimento Portland

A produção mundial de cimento, na última década cresceu paulatinamente a uma taxa média de aproximadamente 4,44 % ao ano. A produção de 1.485 milhões de toneladas em 1996 aumentou para 2.293,3 milhões de toneladas em 2005. A Tabela 2.15 mostra o panorama internacional dos maiores produtores de cimento, e a Figura 2.23 a produção mundial em milhões de toneladas. Em 2005, a China manteve como maior produtor mundial

de cimento. Enquanto a sua produção foi da ordem de 1.049 milhões de toneladas, seguindo a Índia com 146,8 milhões de toneladas e Estados Unidos, com 100 milhões de toneladas. O Brasil ocupa a 10ª posição com 39,2 milhões de toneladas, junto com outros países em desenvolvimento como México, Tailândia, Turquia e Egito cujas produções variam entre 30 e 40 milhões de t/ano. Vale destacar que dos países da América Latina apenas México e Brasil se sobressaem no ranking mundial.

Tabela 2.15 Maiores produtores internacionais de cimento (milhões de toneladas).

Posição	Países	2002	2003	2004	2005	Percentual em relação a 2005
1º	China	704,1	813,6	933,7	1049,0	45,74%
2º	Índia	110,1	124,5	136,9	146,8	6,40%
3º	EUA	89,7	92,8	97,4	100,0	4,36%
4º	Japão	76,4	73,8	72,4	73,5	3,20%
5º	Espanha	42,4	44,8	46,6	50,3	2,19%
6º	Rússia	40,1	42,6	45,9	49,5	2,16%
7º	Coréia Sul	56,4	59,7	55,8	49,1	2,14%
8º	Itália	41,5	43,5	46,1	46,4	2,02%
9º	Turquia	37,2	38,1	41,3	45,6	1,99%
10º	<b>Brasil</b>	<b>38,0</b>	<b>34,0</b>	<b>34,4</b>	<b>39,2</b>	1,71%
11º	Tailândia	38,8	35,6	36,7	37,9	1,65%
12º	Egito	26,2	26,3	35,5	36,5	1,59%
13º	Indonésia	35,1	34,9	37,9	37,9	1,65%
14º	México	32,0	32,6	33,9	35,4	1,54%
15º	Irã	28,8	30,5	31,0	32,7	1,43%
ND	Outros	412,9	430,0	456,6	463,5	20,21%
	Total mundial	1.815,0	1.964,4	2.139,4	2.293,3	100,00%

Fonte: Adaptado de SNIC, CEMBUREAU e OFICEMEN (out/2007)

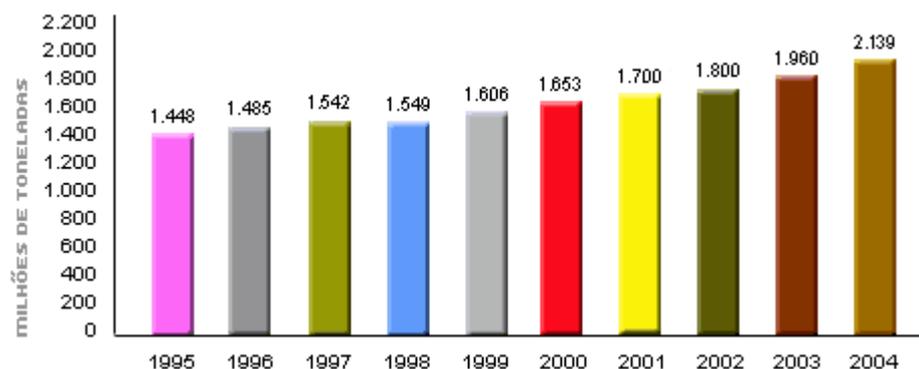


Figura 2.24 Produção mundial de cimento em milhões de toneladas.

Fonte: Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC).

## 2.7.2 - Produção Nacional De Cimento Portland

A produção nacional de cimento teve um crescimento expressivo entre os anos de 1992 a 1999 a uma taxa média de aproximadamente 7,71% ao ano. O ano de 1999 foi excepcional, alcançando 40,2 milhões de toneladas. A partir de 2000, a produção sofreu queda resultante das sucessivas crises mundiais e conseqüente instabilidade econômica. Em 2004 o consumo se estabilizou, indicando o início de uma retomada. Em 2006 finalmente o consumo de cimento voltou ao patamar de 40 milhões de toneladas, com o aquecimento da construção civil (SNIC Press Kit, 2007).

As expectativas para o futuro são otimistas, o Brasil tem um enorme potencial de crescimento para o setor, apresenta um déficit habitacional de mais de 6 milhões de moradias. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento, dados estatísticos preliminares e estimativas de mercado indicam que as vendas de cimento para o mercado interno brasileiro, acumuladas nos últimos doze meses (jul/07 a jun/08) atingiram 47,8 milhões de toneladas. O Brasil está entre os 10 maiores produtores de Cimento Portland do mundo e, detém uma das mais avançadas tecnologias na fabricação desse insumo com uma capacidade de produção em torno de 63 milhões t/ano e 57 fábricas em funcionamento (SNIC,2007). A Figura 2.24 mostra a produção nacional de cimento de 1970 a 2006, e a Figura 2.25 mostra a posição do Brasil na produção e consumo mundial de cimento.

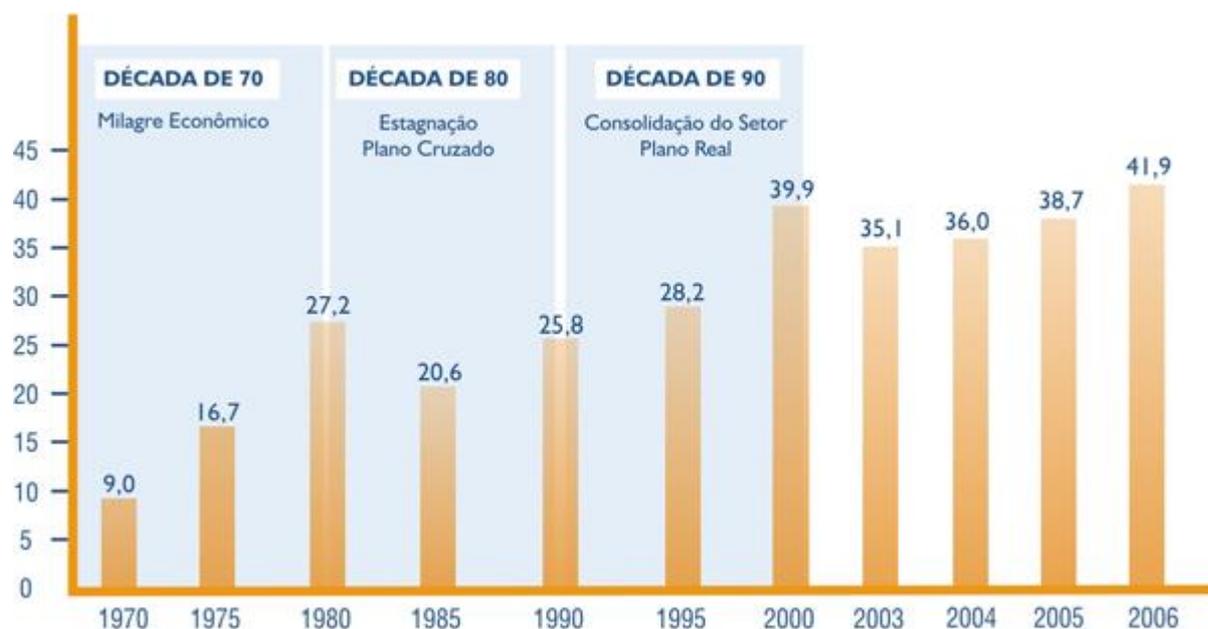


Figura 2.25- Produção de cimento no Brasil em milhões de toneladas.

Fonte: SNIC (2007)

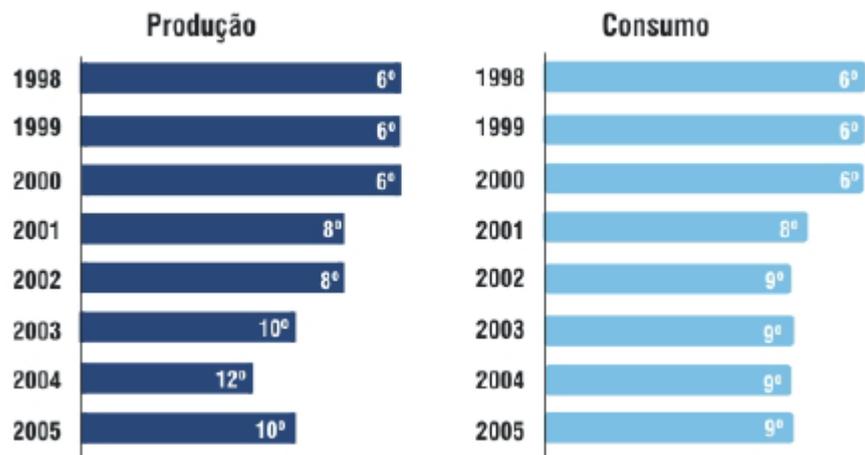


Figura 2.26 Posição do Brasil na produção e consumo mundial de cimento.

Fonte: CEMBUREAU, 2007.

## Capítulo 3

# COMBUSTÍVEL E ENERGIA ELÉTRICA NA PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

### 3.1- INTRODUÇÃO

A indústria de cimento é uma indústria de consumo intensivo de energia. Nas melhores tecnologias, o consumo específico de energia térmica para fabricação do clínquer é de 2900-3200 MJ/t de clínquer e o consumo de energia elétrica para movimentação mecânica dos equipamentos é de aproximadamente 90 a 120 kWh/t cimento (CEMBUREAU, 1999). Nas cimenteiras brasileiras, que utilizam os “processos por via seca”, com sistemas de pré-aquecimento e pré-calculação, apresentam consumos específicos de energia térmica em torno de 3.300 MJ/t clínquer (Santi, 1997).

Os combustíveis convencionais ou fósseis atualmente utilizados pela indústria de cimento para fabricação do clínquer são:

- Coque de petróleo;
- Carvão mineral;
- Carvão vegetal;

- Óleos combustíveis;
- Gás natural.

Parte do combustível principal pode ser substituída por combustíveis alternativos. Tais como:

- Moinha de carvão vegetal;
- Pneus inservíveis;
- Resíduos de madeira;
- Resíduos industriais, agrícolas e urbanos, possíveis de serem co-processados;

A escolha de um determinado tipo de combustível se faz em função do seu custo, de sua disponibilidade no mercado e fatores técnicos como temperatura de chama, poder calorífico inferior, composição químicas elementares e constituintes que não afetem a qualidade do clínquer e conseqüentemente do cimento.

A reação de sinterização acontece após os materiais alcançarem temperatura de aproximadamente 1450 °C, numa atmosfera oxidante de gases no interior do forno rotativo. A maior parte do calor transferido aos materiais se dá por radiação a uma temperatura de chama por volta de 2000 °C. A fim de manter este padrão, combustíveis com baixo poder calorífico são queimados juntamente com outros de maior poder calorífico, quando não atendam aos requisitos necessários para sua queima individual no queimador principal do forno (Silva, 1994).

O combustível mais utilizado atualmente pelas cimenteiras brasileiras é o coque de petróleo, substituindo combustíveis convencionais tradicionais no setor, como o óleo combustível e o carvão mineral. A partir de meados da década de 70, houve um aumento considerável no custo destes combustíveis em conseqüência da crise do petróleo. Desde então, o setor cimenteiro vem desenvolvendo novas tecnologias, com o propósito de reduzir o consumo de energia e substituir os combustíveis convencionais por outros de menor custo. Observando a Tabela 3.1 verifica-se que o consumo de óleo combustível na indústria de cimento no ano de 1970 foi de 91,3%, reduzindo drasticamente para 0,7% em 2006, enquanto o coque do petróleo passou de 0% em 1970 para 65,8% em 2006. Uma nova tendência é substituir parte do coque de petróleo por resíduos considerados nobres, como moinha de carvão vegetal e pneus inservíveis como também

outros resíduos industriais, urbanos e agrícolas. O co-processamento de resíduo será tratado no Item 3.3.

Tabela 3.1 Consumo Percentual de Energia no Setor de Cimento no Brasil (1970 a 2006).

<b>IDENTIFICAÇÃO</b>	<b>1970</b>	<b>1975</b>	<b>1980</b>	<b>1985</b>	<b>1990</b>	<b>1995</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>
Carvão mineral	0,0	0,0	9,1	47,8	25,7	17,2	5,5	0,2	2,1
Óleo combustível	91,3	90,5	74,2	4,1	43,3	53,9	15,2	0,8	0,7
Eletricidade	6,9	8,2	10,0	10,1	11,1	11,9	11,4	12,2	11,5
Carvão vegetal	0,0	0,0	3,8	34,6	15,4	12,0	6,9	8,8	8,5
Coque do petróleo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,1	54,9	66,5	65,8
Outros	1,8	1,3	2,8	3,5	4,2	3,9	6,2	11,5	11,4
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>								

Fonte: Adaptado de BEN (2008)

## **3.2 - COMBUSTÍVEIS CONVENCIONAIS NA INDÚSTRIA DE CIMENTO**

O objetivo é apresentar as características individuais de cada combustível, como poder calorífico e problemas operacionais decorrentes de seus componentes.

### **3.2.1- Coque de Petróleo**

O coque de petróleo que era considerado combustível alternativo pela indústria de cimento, atualmente é o combustível principal mais utilizado. No Brasil, em 2006, o coque de petróleo respondeu por 66% do total dos combustíveis queimados nas cimenteiras (BEN, 2008), e a tendência é o uso cada vez mais intensivo porque tem alta disponibilidade e baixo preço. A indústria de cimento pode utilizar o coque de petróleo com alto teor de enxofre devido às condições alcalinas existente no seu processo de produção. O dióxido de enxofre, originado da queima do coque de petróleo reage com os compostos de cálcio, sódio e potássio, contidos no cru, resultando os compostos:  $\text{CaSO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ; que são incorporado ao clínquer.

No processo por via seca com forno rotativo equipado com pré-aquecedor e pré-calcinador, a taxa de dióxido de enxofre que reage com os compostos de cálcio, sódio e potássio, ocorrem em níveis superiores a 90% pois a combustão no pré-calcinador tem um ambiente extremamente alcalino (Santos e Silva, 2006).

O coque de petróleo é um subproduto do processo de refinamento complexo de derivados de petróleo, denominado craqueamento catalítico fluido, com craqueamento posterior para regeneração do catalisador. Atualmente são produzidos dois tipos de coque nas refinarias de petróleo:

#### **3.2.1.1 - Coque fluido**

Coqueamento em leito fluidizado, obtido em processo contínuo. Formado por pequenas esferas de diâmetro inferior a 1 mm, muito duras, contendo de 5% a 6% de voláteis. Sua dureza dificulta o processo de moagem.

#### **3.2.1.2 - Coque verde**

Coqueamento retardado, obtido em processos não contínuos, com tamanho e forma bastante irregulares. O conteúdo de enxofre varia entre 0,5% e 5%. Apresenta maior teor de voláteis que o coque fluido. O Brasil atualmente só produz o coque verde e exporta a maior parte de sua produção, devido seu baixo teor de enxofre, menos que 1% (Speight, 2004, apud Santos e Silva, 2006).

A Figura 3.1 mostra a sua direita, aglomerados de coque de petróleo verde em uma unidade de coqueamento retardado da Refinaria Presidente Bernardes, em Cubatão (SP).



Figura 3.1 Unidade de coqueamento retardado de petróleo verde.

Fonte: Catálogo Petrobras (2008).

### 3.2.1.3 - Característica do coque de petróleo

O coque de petróleo é caracterizado pelo seu alto teor de carbono, alto poder calorífico, pode ter alto conteúdo de enxofre, baixos conteúdos de voláteis e baixos teores de cinzas.

A Tabela 3.2 mostra os dados de 10 tipos de coques de petróleo de origens diferentes, analisados pelos pesquisadores Commandré e Salvador (2005), em laboratórios na França.

Tabela 3.2 - Análise de 10 tipos de coque de petróleo.

Coque Tipo	C %	H %	O %	S %	N%	MV%	Cinza %	PCI kJ/kg
01	81,20	3,30	---	5,97	1,80	11,43	5,88	32950
02	87,85	3,51	1,10	7,47	1,61	10,48	0,33	34450
03	87,95	3,71	0,90	7,23	1,51	9,95	0,36	34400
04	87,90	3,51	1,10	7,08	1,51	10,09	0,38	34350
05	87,05	3,89	2,43	4,05	2,03	12,63	1,25	34500
06	83,96	3,60	1,72	7,14	1,21	10,91	0,91	34400
07	83,39	3,89	3,11	6,62	1,31	14,47	0,44	33400
08	87,65	4,16	1,52	4,67	1,52	11,97	1,40	34900
09	86,69	3,66	1,53	4,37	1,42	9,69	1,75	34050
10	82,18	3,75	2,02	5,89	1,32	8,99	1,22	34300

Fonte: (Commandré e Salvador, 2005)

A Tabela 3.3 mostra os resultados de algumas análises de coques de petróleo, procedentes do Golfo do México, consumidos pela Indústria Brasileira de Cimento, e analisadas nos laboratórios da Associação Brasileira de Cimentos Portland (2003).

Tabela 3.3 Resultados de análise de coque de petróleo

<b>Coque Tipo</b>	<b>Umidade %</b>	<b>Voláteis %</b>	<b>Cinzas %</b>	<b>Carbono Fixo %</b>	<b>Enxofre %</b>	<b>PCI kJ/kg</b>
01	2,60	17,68	0,79	78,93	4,70	35337
02	4,72	---	---	78,50	6,20	32938
03	5,95	16,07	0,70	77,28	5,80	35538
04	3,30	16,25	0,53	85,90	6,70	34637
05	6,30	16,38	1,52	75,80	6,00	34939
06	0,57	15,93	2,13	85,60	6,10	34738
07	5,90	15,70	2,14	83,60	6,20	34838
08	6,70	15,33	1,79	86,20	6,30	34637
09	9,20	14,62	1,38	89,60	6,90	35039
10	---	16,11	0,47	86,90	6,80	35240

Fonte: – ABCP (2003)

### 3.2.2- Carvão Mineral

O carvão mineral é um combustível fóssil, utilizado na indústria de cimento, moído puro ou em mistura com outros combustíveis. O percentual da mistura está ligado à diversas propriedades do carvão, que variam de acordo com a procedência do carvão, com as propriedades dos outros combustíveis, e também com as características do forno rotativo em que será utilizado.

O carvão mineral é um combustível fóssil sólido, de cor entre castanha e negra, formado pela decomposição parcial de matéria vegetal, livre do contato com o ar e, em muitos casos, sob a influência de aumento de pressão e de temperatura que perderam oxigênio e hidrogênio e se enriqueceram em carbono, em um processo denominado carbonização, concentrando o carbono, que é a base do combustível fóssil chamado carvão mineral. O carvão brasileiro, de um modo geral, é de qualidade inferior aos carvões do hemisfério norte porque a flora que lhe deu origem e o regime de deposição trouxe, simultaneamente, matéria vegetal e mineral, o que deu origem ao alto teor de cinza, reduzindo seu poder calorífico. No Brasil, o carvão mineral teve sua formação

no período Permiano, há cerca de 210 milhões de anos. No hemisfério norte, de um modo geral, os carvões são originários do período Carbonífero (há cerca de 250 milhões de anos). Existem seis estágios na formação do carvão: turfa, sapropelito, linhito, sub-betuminoso, betuminoso e antracito. O estágio mínimo para a utilização industrial do carvão é o do linhito.

### 3.2.2.1- Classificação dos carvões minerais

Os principais tipos de carvão são:

**Linhito** - Carvão que apresenta um baixo grau de carbonização e poder calorífico a partir de uma base úmida, livre de matéria mineral. Este carvão está subdividido em 2 grupos:

Linhito: tipo A:  $14650 \text{ kJ/kg} \leq \text{PCI} < 19310 \text{ kJ/kg}$

Linhito: tipo B:  $\text{PCI} < 14650 \text{ kJ/kg}$

**Sub-betuminoso** - Carvão que apresenta um grau de carbonização ligeiramente superior ao apresentado pelo linhito, a partir de uma base úmida, livre de matéria mineral. Este carvão é classificado em três grupos em uma ordem decrescente de poder calorífico:

Sub-betuminoso A  $24420 \text{ kJ/kg} \leq \text{PCI} < 26750 \text{ kJ/kg}$

Sub-betuminoso B  $22100 \text{ kJ/kg} \leq \text{PCI} < 24420 \text{ kJ/kg}$

Sub-betuminoso C  $19310 \text{ kJ/kg} \leq \text{PCI} < 22100 \text{ kJ/kg}$

**Betuminoso** - Carvão que apresenta um alto grau de carbonização, possuindo menos que 86% de carbono fixo, 14% de matéria volátil em uma base seca, livre de matéria mineral. Esse tipo de carvão está subdividido em cinco grupos de carvão a partir de uma ordem decrescente de poder calorífico e carbono fixo e crescente de matéria volátil: Carvão betuminoso de **baixo** volátil ( $A_1$ ), médio volátil ( $A_2$ ), e de grande volátil ( $A_3$ ).

Betuminoso de grande volátil  $A_1, A_2, A_3$   $32570 \text{ kJ/kg} \leq \text{PCI}$

Betuminoso de grande volátil B  $30240 \text{ kJ/kg} \leq \text{PCI} < 32570 \text{ kJ/kg}$

Betuminoso de grande volátil C  $26750 \text{ kJ/kg} \leq \text{PCI} < 30240 \text{ kJ/kg}$

**Antracito** - Carvão de maior grau de carbonização, apresentando mais que 86% de carbono fixo e menos que 14% de matéria volátil em uma base seca, livre de matéria mineral.

Esse tipo de carvão está subdividido em três grupos em uma ordem decrescente de carbono fixo e conteúdo crescente de matéria volátil : meta-antracito, antracito e semi-antracito.

Um resumo da classificação dos carvões por grau de carbonização, juntamente com o seu uso e percentagem de reservas mundiais está ilustrado na Figura 3.2

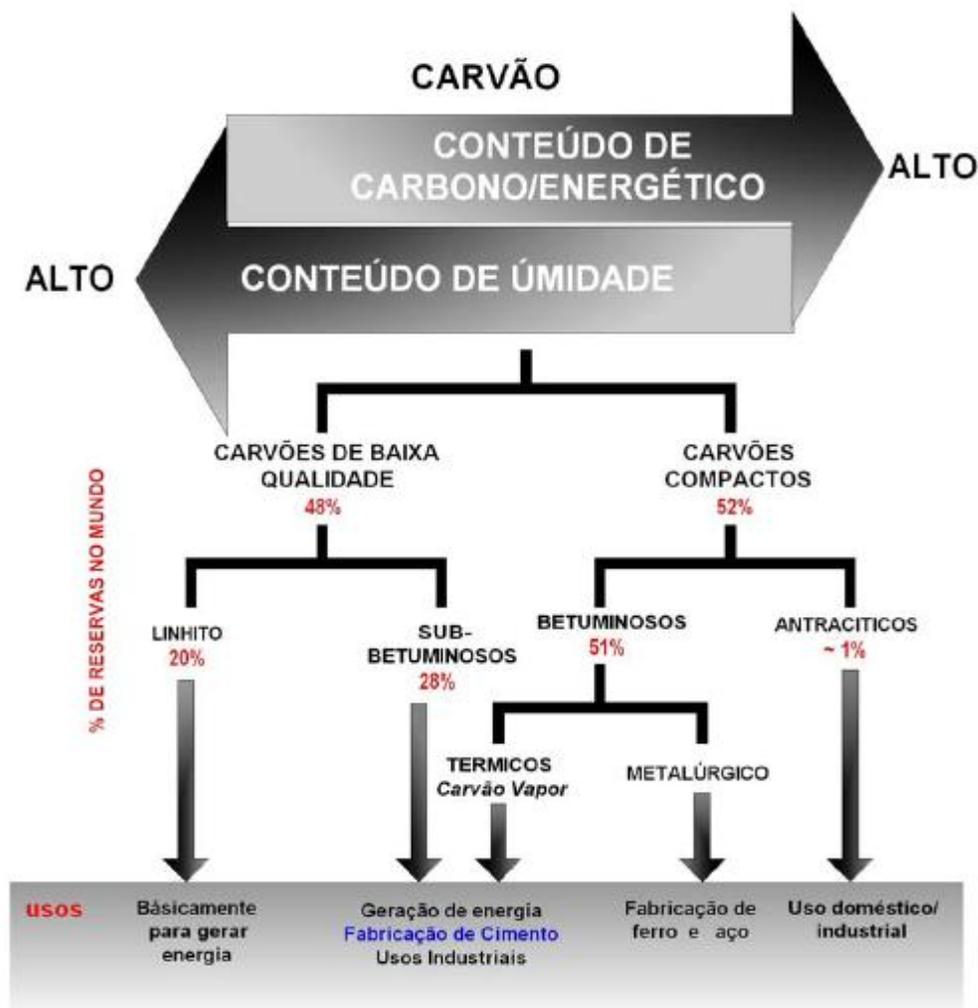


Figura 3.2 – Classificação do carvão com seu respectivo uso e reserva mundial  
Fonte: World Coal Institute (2004 apud CORÁ, 2006).

### 3.2.2.2- Características do carvão mineral brasileiro

Como comentado anteriormente, o carvão mineral brasileiro é de qualidade inferior aos carvões do hemisfério norte, tem um alto teor de cinzas, o que dificulta sua aplicação como carvão metalúrgico, sendo bastante usado como energético nas usinas de geração de energia elétrica. A Tabela 3.4 mostra as principais características dos carvões encontrados no sul do Brasil, e a Tabela 3.5 mostra suas propriedades.

Tabela 3.4 - Principais Características dos Carvões Brasileiros

<b>Tipo de Carvão</b>	<b>Cinza % em massa</b>	<b>Enxofre % em massa</b>	<b>Umidade % em massa</b>	<b>PCS kJ/kg</b>
Pré-lavado de SC	31,7	2,0	2,4	23582,5
Candiota - RS	51,4	1,3	15,0	13810,5
Charqueadas – IIF - RS	56,6	1,6	8,0	12262,0
Charqueadas – I2B - RS	45,0	1,2	8,8	16698,2
Leão - RS	52,0	1,5	9,6	----

Fonte: Garcia (2002).

Tabela 3.5 – Propriedades dos Carvões Minerais do Brasil

<b>Procedência</b>	<b>C %</b>	<b>S %</b>	<b>H<sub>2</sub> %</b>	<b>N<sub>2</sub> %</b>	<b>O<sub>2</sub> %</b>	<b>Cinzas %</b>	<b>Umidade %</b>	<b>% de voláteis</b>	<b>PCS kJ/kg</b>
Butiá	42,88	1,35	---	---	---	13,59	11,51	32,02	---
Jacuí	49,82	0,85	---	---	---	21,18	9,58	19,42	---
Tubarão	40,79	1,10	---	---	---	28,21	1,90	29,10	---
Criciúma	46,90	1,63	---	---	---	23,64	1,50	27,96	---
RGS	46,0	12,99	4,05	0,29	9,27	27,4	11,0	---	19883,50
Paraná	56,6	2,0	3,11	0,80	17,73	25,76	15,0	---	26539,24
Sta. Catarina	51,8	3,6	3,34	0,52	7,58	33,09	10,0	---	26413,66
Cabo Frio(a)	20,5	---	---	---	---	21,7	15,8	42,0	12118,47
Cabo Frio(b)	17,6	---	---	---	---	13,7	13,2	49,5	14525,42
Resende	12,6	---	---	---	---	42,2	12,0	33,2	10548,72

Fonte: Garcia (2002)

--- Representam propriedades não avaliada

O teor de cinzas dos carvões minerais brasileiros apresentados na Tabela 3.4 não é um fator limitante para sua queima nos fornos rotativos em fábricas de cimento. Segundo Junior (1993), o

carvão pode ser utilizado sem problemas até teores de cinzas entre 35 e 40%, caso se tenha a presença de pelo menos 25% de materiais voláteis em sua composição.

As cinzas presentes no carvão podem ser consideradas como matérias-primas argilosas para fabricação do clínquer, são altamente reativas, fornecendo ao cimento excelentes propriedades de resistência à compressão, às águas agressivas e à impermeabilidade (Silva, 1994).

Os diversos minerais encontrados nas cinzas variam em suas composições dependendo da origem e tipo de carvão. A Tabela 3.6 mostra a composição média das cinzas de carvão mineral retirados de diferentes minas.

Tabela 3.6– Composição Média das Cinzas de Carvão Mineral de alguns países

Compostos	Brasil			Inglaterra	Alemanha	USA
	RS*	RS**	SC***			
SiO <sub>2</sub>	70,22	65,50	58,48	25 – 50	25 – 45	20 – 60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,93	23,25	26,70	20 – 40	15 – 21	10 – 35
TiO <sub>2</sub>	ND	ND	ND	0 – 3	---	0,5 – 2,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,33	5,49	7,96	0 – 30	10 – 45	5 – 35
CaO	1,05	2,40	2,12	1 – 10	2 – 4	1 – 20
MgO	0,61	0,40	0,84	0,5 – 5	0,5 – 1	0,3 – 4
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	1,57	2,62	3,42	1 – 6	1 – 5	1 – 4
SO <sub>3</sub>	1,09	0,44	0,36	1 - 12	4 - 10	0,1 - 12

Fonte: Adaptado (Silva, 1994), (Barbosa e Menon, 1993), (Sprung, 1985)

\* Carvão Mineral com teor de cinzas de 50%, retirado de minas do Rio Grande do Sul

\*\* Carvão Mineral com teor de cinzas de 35%, retirado de minas do Rio Grande do Sul

\*\*\* Carvão Mineral com teor de cinzas de 35%, retirado de minas de Santa Catarina

Quando é queimado um carvão com alto teor de cinzas e alto conteúdo de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, o conteúdo de CaCO<sub>3</sub> do cru deve ser aumentado de forma correspondente, para que o Fator de Saturação de Cal do clínquer se mantenha constante (Silva, 1994).

Além dos elementos principais a cinza do carvão contém elementos traços que podem causar maior impacto ao meio ambiente e merecem considerações especiais.

Os elementos traços comumente encontrados nas cinzas do carvão são: Cloro, Flúor, Bromo, Iodo, Zinco, Cromo, Níquel, Chumbo, Arsênio, Cádmio, Tálcio e Vanádio.

### 3.2.2.3- Reservas de carvão mineral

Entre os combustíveis fósseis o carvão mineral é o que possui a maior reserva mundial. É estimado que há mais de um trilhão de toneladas de carvão em reservas, geograficamente distribuídas em vários países e em todos os continentes.

No Brasil as reservas de carvão mineral estão localizadas nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e São Paulo. Segundo o Serviço Geológico do Brasil as reservas brasileiras de carvão somam cerca de 32 bilhões de toneladas, desse total o Estado do Rio Grande do Sul possui 89,25%, Santa Catarina 10,41%, Paraná 0,32% e São Paulo 0,02%. Candiota é a principal jazida de carvão mineral do País, sua capacidade de lavra é de cerca de 10,6 milhões t/ano.

A Tabela 3.7 apresenta o consumo do carvão mineral nacional, em 2007 por setor. Cerca de 81,67% do carvão utilizado no Brasil foram queimados em caldeiras de termelétricas para produção de energia elétrica, e apenas, 1,54% na produção de clínquer nas indústrias de cimentos. A Figura 3.6 mostra a venda de carvão mineral por setores.

Tabela 3.7- Consumo de carvão mineral nacional em 2007 por setor.

SETOR	CONSUMO Toneladas	CONSUMO
Alimentos	91.847	1,44
Cerâmico	173.652	2,72
Cimento	98.072	1,54
Indústria	71.889	1,13
Elétrico	5.206.970	81,67
Mineração	50.867	0,80
Papel e Celulose	226.626	3,56
Petroquímico	185.117	2,90
Siderúrgico	11.445	0,18
Outros	258.915	4,06
<b>TOTAL:</b>	<b>6.375.400</b>	<b>100</b>

Fonte: SIECESC.

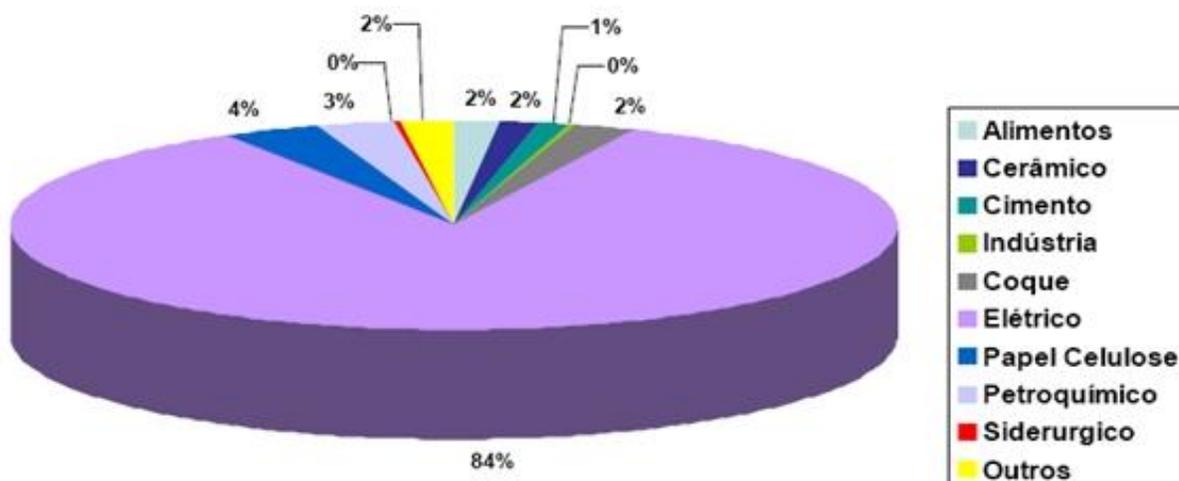


Figura 3.3- Vendas de carvão vegetal produzido no Brasil por setor de consumo

Fonte: SIECESC (2007)

### 3.2.3 - Carvão Vegetal

O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, produzindo, segundo o Balanço Energético Nacional (2007), 10,5 milhões de toneladas/ano. Este insumo energético é usado preponderantemente na produção de ferro-gusa e aço. A indústria de cimento do Brasil utiliza uma porcentagem de carvão vegetal, geralmente misturado ao carvão mineral para corrigir o balanço de cinzas, permitindo também o uso de calcário com menor teor de carbonato de cálcio (Menon et al., 1993 apud Silva, 1994). A moinha de carvão vegetal que não é utilizada pelas siderúrgicas também é um combustível alternativo usado pela indústria de cimento. Por ser muito facilmente desagregado, o carvão vegetal produz muitos finos, devido sua quebra durante a produção, transporte e manuseio, chegando a 20% em peso do total produzido (Carneiro, 2007). O sistema de peneiramento para o carvão vegetal existente nas usinas gera finos com fração abaixo de 6 mm, denominado moinha. A moinha não tem aplicação industrial nos altos fornos das siderúrgicas, sendo considerado um subproduto, é vendida a terceiros por um preço atrativo. Esses finos possuem praticamente as mesmas vantagens do carvão vegetal em valor energético, constituindo-se em um combustível alternativo interessante para a indústria de cimento.

A madeira para a produção do carvão mais utilizada é o eucalipto. A produtividade média é de 14 t/ha. Uma tonelada de madeira de eucalipto produz 0,2 toneladas de carvão vegetal (Pinheiro, 2006).

### 3.2.4 - Óleo Combustível

O óleo combustível foi uma das principais fontes energéticas na fabricação de cimento, sendo considerado um combustível padrão para o setor por muitos anos. Atualmente devido ao seu alto custo é utilizado quase que exclusivamente para dar partida ao forno rotativo. Em 2006, representou apenas 0,7% do consumo total de combustíveis utilizados pela indústria de cimento brasileira (BEN, 2008), conforme mostrado na Tabela 3.1.

O óleo combustível derivado de petróleo, também chamado óleo combustível pesado ou óleo combustível residual é a parte remanescente da destilação das frações do petróleo, designadas de modo geral como frações pesadas, obtidas em vários processos de refino. A composição bastante complexa dos óleos combustíveis depende não só do petróleo que os originou, como também do tipo de processo e misturas que sofreram nas refinarias, de modo que se podem atender as várias exigências do mercado consumidor numa ampla faixa de viscosidade. A indústria de cimento optou para tipos mais viscosos e mais baratos. Os tipos de óleos combustíveis são especificados pelo Departamento Nacional de Combustíveis (Resolução CNP N° 03/86), baseando-se em teores de enxofre e faixas de viscosidade.

- **GRUPO A:** alto teor de enxofre máximo (5% em massa - óleo 1A e 5,5% em massa nos demais tipos)
- **GRUPO B:** baixo teor de enxofre máximo (1% em massa)

Cada um destes grupos se divide em nove tipos acordo com suas viscosidades, conforme especificado na Tabela 3.8.

**Óleos combustíveis convencionais** - São considerados assim os óleos tipos 1 A/B e 2 A/B. São utilizados para os fins industriais em geral.

**Óleos combustíveis ultra-viscosos** - São considerados ultra viscosos os óleos a partir dos tipos 3 A/B até os tipos 9 A/B. São utilizados em grandes fornos e caldeiras, onde o consumo de combustível é bem elevado, onde são considerados cuidados adicionais à suas utilizações e estão disponíveis equipamentos especiais para seus aquecimentos de armazenagem, transferência e nebulização.

Tabela 3.8 - Tipos de óleos combustíveis especificados pelo DNC

Tipos	Ponto de fulgor mínimo em °C	Teor de Enxofre máximo em % massa	Águas e Sedimentos máximo em % Volume	Viscosidade Saybolt Furol máxima a 50 °C
1A	66	5,0	2,0	600
1B	66	1,0	2,0	600
2A	66	5,5	2,0	900
2B	66	1,0	2,0	900
3A	66	5,5	2,0	2400
3B	66	1,0	2,0	2400
4A	66	5,5	2,0	10000
4B	66	1,0	2,0	10000
5A	66	5,5	2,0	30000
5B	66	1,0	2,0	30000
6A	66	5,5	2,0	80000
6B	66	1,0	2,0	80000
7A	66	5,5	2,0	300000
7B	66	1,0	2,0	300000
8A	66	5,5	2,0	1000000
8B	66	1,0	2,0	1000000
9A	66	5,5	2,0	Sem limite
9B	66	1,0	2,0	Sem limite

Fonte: Adaptado de PETROBRAS (2008).

### 3.2.5 - Gás Natural

O gás natural é um combustível gasoso, pouco utilizado pela indústria de cimento. O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves, de origem fóssil, composto principalmente pelos gases Metano ( $\text{CH}_4$ ), Etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), Propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), Butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) e outros em menores quantidades. É incolor, inodoro, atóxico, apresenta em estado gasoso nas condições ambiente de pressão e temperatura e é mais leve que o ar.

Na natureza o gás natural é encontrado em reservatórios subterrâneos, tanto em terra quanto no mar. Normalmente estes reservatórios contêm gás natural associado ao petróleo. Nestes casos, o gás recebe a designação de gás natural associado. Quando o reservatório contém pouca ou nenhuma quantidade de petróleo, o gás recebe a designação de gás natural não associado.

### 3.2.5.1 - Composição e características do gás natural bruto

A composição do gás natural bruto depende de uma série de fatores naturais que determinaram o seu processo de formação e as condições de acumulação do seu reservatório de origem. O gás natural como encontrado na natureza é uma mistura variada de hidrocarbonetos gasosos cujo componente preponderante é sempre o Metano ( $\text{CH}_4$ ) e em menores proporções o Etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), Propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), Butano  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  e hidrocarbonetos mais pesados. Além dos hidrocarbonetos fazem parte da composição do gás natural bruto outros componentes, tais como o Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), o Nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), Hidrogênio Sulfurado ( $\text{H}_2\text{S}$ ), Água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), Ácido Clorídrico ( $\text{HCl}$ ), Metanol e impurezas sólidas. A presença e proporção destes elementos dependem fundamentalmente da localização do reservatório, da geologia do solo e do tipo de rocha onde se encontra.

A Tabela 3.9 apresenta a composição do gás natural bruto em alguns países e a Tabela 3.10 mostra a Composição do Gás Natural Bruto no Brasil em seis diferentes origens.

Tabela 3.9 - Composição do gás natural bruto em alguns países.

Origem	Metano % em v	Etano % em v	Propano % em v	C <sub>4</sub> e maiores % em v	CO <sub>2</sub> % em v	N <sub>2</sub> % em v	Densidade % em v	PCS kJ/kg (MJ/Nm <sup>3</sup> )
Pérsia	66,0	14,0	10,5	7,0	1,5	1,0	0,870	53,3
Mar do Norte	94,7	3,0	0,5	0,4	0,1	1,3	0,590	36,6
Argélia	76,0	8,0	3,3	4,4	1,9	6,4	-	46,2
Venezuela	78,1	9,9	5,5	4,9	0,4	1,2	0,702	47,7
Argentina	95,0	4,0	-	-	-	1,0	0,578	40,7
Bolívia	90,8	6,1	1,2	0,0	0,5	1,5	0,607	38,8
Chile	90,0	6,6	2,1	0,8	-	-	0,640	45,2

Fonte: Adaptado da Petrobrás.

Tabela 3.10 - Composição do gás natural bruto no Brasil.

Origem	Metano % em volume	Etano % em volume	Propano % em volume	C <sub>4</sub> e Maiores % em vol.	CO <sub>2</sub> % em volume	N <sub>2</sub> % em volume	Densidade % em volume	PCS kJ/kg (MJ/Nm <sup>3</sup> )
Rio de Janeiro	89,44	6,7	2,26	0,46	0,34	0,8	0,623	40,22
Bahia	88,56	9,17	0,42	-	0,65	1,2	0,615	39,25
Alagoas	76,9	10,1	5,8	1,67	1,15	2,02	-	47,7
Rio G. N.	83,48	11	0,41	-	1,95	3,16	0,644	38,54
Espírito Santo	84,8	8,9	3,0	0,9	0,3	1,58	0,664	45,4
Ceara	76,05	8,0	7,0	4,3	1,08	1,53	-	52,8

Fonte: Adaptado de PETROBRÁS.

### 3.2.5.2 - Composição e características do gás natural comercial

A composição comercial do gás natural é variada e depende da composição do gás natural bruto e do mercado a ser atendido. Os parâmetros que determinam a especificação comercial do gás natural são seus teores de enxofre total, gás sulfídrico, gás carbônico e gases inertes, o ponto de orvalho da água, o ponto de orvalho dos hidrocarbonetos e o poder calorífico. Na sua produção, o gás deve passar por vasos separadores, que são projetados e equipados para tirar os hidrocarbonetos, a água que estiver em estado líquido e as partículas sólidas. O gás que contenha compostos de enxofre é enviado para unidades de dessulfurização, onde esses contaminantes serão removidos.

A Portaria N.º 41, de 15 de Abril de 1998 da ANP, especifica as normas para a o Gás Natural a ser comercializado no Brasil, de origem interna e externa, igualmente aplicáveis às fases de produção, de transporte e de distribuição desse produto.

A Tabela 3.11 apresenta as especificações do Gás Natural Comercializado no Brasil de acordo com as Normas:

- ASTM D 1945 - Standard Test Method for Analysis of Natural Gas by Gas Chromatography;
- ASTM D 3588 Calculating Heat Value, Compressibility Factor, and Relative Density (Specific Gravity) of Gaseous Fuels;
- ASTM D 5454 - Standard Test Method Water Vapor Content of Gaseous Fuels Using Electronic Moisture Analyzers;

- ASTM D 5504 - Standard Test Method for Determination of Sulfur Compounds in Natural Gas and Gaseous Fuels by Gas Chromatography and Chemiluminescence;
- ISO 6326 - Natural Gas - Determination of Sulfur Compounds, Parts 1 to 5.

Tabela 3.11 – Especificação para o gás natural comercializado no Brasil

Características *	Brasil			Unidades	Métodos de Ensaios
	B (baixo)	M (médio)	A (alto)		
Poder Calorífico Superior (PCS)	8000 a 9000	8000 a 10200	10000 a 12500	kcal/m <sup>3</sup>	ASTM D 3588
Densidade Relativa ao Ar	0,54 A 0,6	0,55 a o,69	0,66 a 0,82		ASTM D 3588
Teor Máximo de Gás Sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	20	20	20	mg/m <sup>3</sup>	ASTM D 5504 ou ISSO 6326-3
Teor Máximo de enxofre (H <sub>2</sub> S e enxofre mercaptídico)	80	80	80	mg/m <sup>3</sup>	ASTM D 5504 ou ISSO 6326-3
Teor Máximo de Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) **	2	2	2	% em volume	ASTM D 1945 ou ISSO 6974
Teor Máximo de inertes ***	4	4	4	% em volume	ASTM D 1945 ou ISSO 6974
Teor Máximo de oxigênio (O <sub>2</sub> )	0,5	0,5	0,5	% em volume	ASTM D 1945 ou ISSO 6974
Ponto de orvalho Máximo da Água à 1 atm ****	-45	-45	-45	C	ASTM D 5454

Fonte: Adaptada da ANP (Regulamento Técnico ANP N.º 001/98)

\* Limites especificados são valores referidos a 20°C a 1 atm

\*\* Para as Regiões Norte e Nordeste, admite-se o valor de 3,5

\*\*\* Para as Regiões Norte e Nordeste, admite-se o valor de 6,0

\*\*\*\* Para as Regiões Norte e Nordeste, admite-se o valor de - 39.

O gás natural comercializado é composto basicamente por Metano, Etano e Propano. O poder calorífico do Etano é 1,8 vezes maior que o do Metano e o do Propano é superior 2,6 vezes superior ao do Metano. Pela predominância do Metano na composição do gás natural, todas as análises físicas e termodinâmicas podem ser realizadas como se este fosse o único gás presente na mistura, sem comprometimento dos resultados, como tem mostrado a prática.

### 3.2.5.3- Características do gás natural liquefeito (GNL)

O Gás Natural Liquefeito é uma mistura, em fase líquida de vários constituintes. Seu comportamento, na presença dos vapores destes componentes obedece às leis da termodinâmica

do equilíbrio de fases das misturas. A liquefação consiste em processos termodinâmicos que promovem a mudança de estado dos gases para o estado líquido, com o propósito de estocá-lo e transportá-lo sob forma condensada em condições técnico-econômicas viáveis (menos de 500 kg/m<sup>3</sup>).

**Ponto de Vaporização:** -162 °C à pressão atmosférica (ponto em que ocorre a mudança de fase do estado líquido para o estado gasoso em certa combinação de temperatura e pressão);

**Limite de inflamabilidade inferior:** 5% do volume (menor proporção de gás em mistura com o ar que irá queimar sem a aplicação contínua de calor de uma fonte externa);

**Limite de inflamabilidade superior:** 15% do volume; (proporção de gás na mistura a partir da qual o gás age como diluente e a combustão não pode se auto-propagar);

**Densidade relativa em relação à água a 4 °C :** entre 0,43 a 0,48, conforme a composição;

**Calor de vaporização latente:** 502 kJ/kg (120 kcal/kg);

**Temperatura do líquido à pressão atmosférica:** entre (-165) °C e (-155) °C, dependendo da composição;

**Taxa de expansão:** vaporização de 1 m<sup>3</sup> de GNL produz entre 560 e 600 Nm<sup>3</sup> de gás.

### 3.2.5.4 - Vantagens e desvantagens da utilização do gás natural

#### **Vantagens:**

**Por estar no estado gasoso,** o gás natural não precisa ser atomizado para queimar. Isso resulta numa combustão limpa, com reduzida emissão de poluentes e melhor rendimento térmico. O gás natural caracteriza-se por sua eficiência, limpeza e versatilidade;

**Densidade inferior à do ar:** O gás natural é o único gás cuja densidade relativa é inferior à do ar, dispersa rapidamente na atmosfera em caso de vazamento. Este fato tem importância decisiva para segurança;

**Baixo impacto ambiental:** O gás natural é uma fonte de energia limpa, que pode ser usada nas indústrias em substituição a outros combustíveis mais poluentes, como óleos combustíveis, lenha e carvão. É altamente valorizado em consequência da progressiva conscientização mundial da relação entre energia e o meio ambiente;

**Facilidade de transporte e manuseio:** A distribuição feita através de gasoduto contribui para a redução do tráfego de caminhões que transportam outros tipos de combustíveis. Não requer estocagem, eliminando os riscos do armazenamento de combustíveis;

**Despesas** com a manutenção reduzida;

**Grandes reservas de gás natural em todo planeta;**

**Desvantagens:**

Por ser um combustível fóssil, formado a milhões de anos, trata-se de uma energia não renovável, portanto finita;

Preço não acessível para a produção de cimento, a menos que se use em combinação com outros combustíveis ou como combustível principal em co-processamento de resíduos.

### **3.2.5.5 - Gás natural na indústria de cimento**

A Indústria de Cimento no Brasil usa muito pouco o gás natural como combustível principal em seus fornos rotativos. No período de 1970 a 2006, o maior consumo foi em 1980 de 46.000 tep, correspondendo a 1,67 % do consumo total de energia (EPE, 2007).

## **3.3 - COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS NA INDÚSTRIA DE CIMENTO**

Os combustíveis alternativos para a indústria de cimento em sua maior parte são derivados de resíduos industriais urbanos e agrícolas dos quais uma grande parte podem ser co-processados nos fornos rotativos de produção de clínquer. Geralmente os resíduos que apresentam poder calorífico inferior (PCI) maior que 11.300 kJ /kg (base seca), podem ser utilizados como alternativa energética para o processo de produção de cimento.

O co-processamento é uma técnica que une a destruição térmica de resíduos dentro do processo de fabricação do clínquer do Cimento Portland, fazendo o aproveitamento da energia térmica da combustão e incorporando as cinzas ao clínquer. Determinados resíduos podem substituir parcialmente as matérias-primas do processo, desde que apresentem características similares às dos componentes normalmente empregados na produção de clínquer, incluindo-se neste caso, resíduos que contenha substâncias com características de mineralizadores e fundentes. Os fundentes reduzem a temperatura da fase líquida e elevam o conteúdo de fase. O  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  e álcalis agem como fundentes no sistema do clínquer. Os mineralizadores são substâncias que aceleram as reações do estado sólidos e podem promover as reações dentro da fase líquida ou na interface sólido-líquido, tendo a capacidade de intensificar a taxa de formação do clínquer (Centurione, 1992). Os resíduos são destruídos no forno rotativo de produção de clínquer, no qual a temperatura na entrada é da ordem de  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  e a temperatura de chama chega a  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ . Estas altas temperaturas, aliadas ao tempo de residência de cerca de 30 minutos para os materiais sólidos e 3 segundos para os gases, condições de oxigenação adequadas, alta turbulência no interior do forno, ambiente alcalino, interação dos gases de combustão com a matéria-prima, permite a destruição de quase toda matéria orgânica, neutralização e a adsorção de alguns contaminantes e a incorporação das cinzas dos compostos inorgânicos ao clínquer sem prejuízo para sua qualidade (Maríngolo, 2001; Salomon, 2002).

O emprego de resíduos como combustíveis alternativos complementares na indústria de cimento é visto como um ganho ambiental e uma forma viável de reduzir o custo de produção do cimento. O seu uso permite a redução do consumo de combustíveis fósseis, conserva os recursos naturais e fornece uma maneira ambiental sadia para o seu tratamento, ajudando a diminuir o passivo ambiental existente. A indústria cimenteira é incentivada a processá-los, pois ao invés de pagar pelo seu suprimento, ela passa a ter uma receita extra pela destinação final desses resíduos.

A atividade de co-processamento de resíduos em fornos rotativos de clínquer para fabricação de cimento é regulamentada através da resolução CONAMA 264, de 26 de agosto de 1999, e está em vigor desde março de 2000, onde são definidos os procedimentos, critérios e aspectos técnicos específicos de licenciamento ambiental.

### **3.3.1 - Tipos de Resíduos Proibidos de serem Co-processados em Fornos de Cimentos:**

- Resíduos hospitalares não-tratados;
- Lixo doméstico não-classificado;
- Explosivos;
- Elementos radioativos;
- Pesticidas;
- Fossas orgânicas;
- Materiais com alto teor de metais pesados;
- Materiais com alto teor de Cloro;
- Materiais com baixo poder calorífico ou sem contribuição na substituição de matérias-primas.

### **3.3.2 - Tipos de Resíduos que podem ser Co-processados em Fornos de Cimentos:**

- Substâncias oleosas: óleos hidráulicos, óleos lubrificantes, etc.
- Catalisadores usados;
- Resinas, colas e látex;
- Pneus inservíveis ;
- Madeiras;
- Solventes, Ceras;
- Borrachas não cloradas;
- Carvão Ativado usado como Filtro;
- Borras de Tintas;
- Borras Ácidas;
- Resinas Fenólicas e Acrílicas;

- Elementos Filtrantes de Filtros de Óleo;
- Lodos de estação de tratamento de esgoto (ETE);
- Papel, entre outros.

### 3.3.3 - Co-processamento de Pneus Inservíveis

Os pneus usados quando atingem o fim da sua vida útil, ficam impróprios para uso e não podem ser mais recauchutados, tornando-se inservíveis. Os pneus inservíveis possuem alto poder calorífico, em torno de 33 MJ/kg, superior à maioria dos carvões que têm em média 27 MJ/kg (Ferrer, (1997) apud Carpio, (2005)). Além disso, os pneus inservíveis apresentam teor de cinzas inferiores que a maior parte dos tipos de carvão, e menos enxofre do que o carvão betuminoso.

Os pneus inservíveis têm sido utilizados como fonte alternativa de combustível na produção de clínquer de cimento Portland em vários países.

No Brasil o co-processamento de pneu na fabricação do cimento ganhou força a partir de 2002, quando entrou em vigor a resolução CONAMA 258 – aprovada em 26/08/99, que exige dos fabricantes e importadores de pneus a coleta e de destinação adequada dos pneus inservíveis, conforme demonstra a Tabela 3.13.

Tabela 3.12 – Resolução CONAMA 258.

<b>Ano</b>	<b>Produzidos no país Ou importados novos</b>	<b>Importados Reformados</b>
2002	25 %	25 %
2003	50 %	50 %
2004	100 %	100 %
2005	125 %	125 %
2006	Haverá reavaliação pelo IBAMA	Haverá reavaliação pelo IBAMA

Segundo a RECICLANIP, empresa criada pela Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), para atender a Resolução CONAMA 258, o Brasil possui um passivo ambiental de mais de 100 milhões de pneus inservíveis. A partir de 1999, quando teve início o

Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis até junho de 2008, foram recolhidos 780 mil toneladas de pneus inservíveis equivalente a 156 milhões de pneus de passeio. A Tabela 3.14 mostra a equivalência em pesos dos pneumáticos, conforme Instrução Normativa nº 8 do IBAMA.

Tabela 3.13- Instrução Normativa nº 8 do IBAMA.

<b>Pneumáticos</b>	<b>Equivalência em peso kg</b>
Bicicleta	0,45
Motocicleta	2,50
Automóvel	5,00
Camioneta	12,00
Caminhão e ônibus	40,00
Trator	41,00
Fora -de- estrada e terraplenagem	84,00

Fonte: IBAMA (1999).

Com a otimização da operação e logística em todo País e a intensificação de parcerias com as Prefeituras para abertura de novos pontos de coleta, a RECICLANIP reciclou aproximadamente 150 mil toneladas de pneus inservíveis em 2008. No Brasil, a utilização desse material está dividida no uso como combustível alternativo no co-processamento da indústria cimenteira (84%), na utilização para fabricação de pó de borracha, artefatos e asfalto (12%) ou ainda como matéria-prima para solado de sapato e dutos fluviais, entre outras aplicações.

O mercado de pneus inservíveis é estimado em 250 milhões de toneladas ano nos Estados Unidos, em 300 milhões de toneladas ano na União Européia, e de 45 milhões de toneladas ano no Brasil. Nos Estados Unidos 30% dos TDF (Tire Derived Fuel) são utilizados pelas fábricas de cimento como combustível alternativo, e o TDF, corresponde a 57% dos pneus inservíveis descartados anualmente. ( Amari et al. Resources Policy 25,1999). Na Europa, 40% dos pneus inservíveis são utilizados pelas fábricas de cimento como combustível alternativo.

Os pneus em geral são constituídos de 40-50% por borracha e elastômeros, negro de fumo, metal, nylon, poliéster, aditivos químicos, e diferentes elementos como enxofre, cloro, zinco e chumbo. Tem um elevado poder calorífico, porém muitos dos elementos presentes atuam como

contaminantes no processo de combustão. A Figura 3.5 mostra um corte de um pneu para veículos de passeio

### 3.3.4 - O Uso de Pneus, TDF (Tire-Derived-Fuel), Como Combustível Alternativo

O co-processamento de pneus inservíveis em fornos rotativos para produção de clínquer é, uma aplicação ambientalmente correta e que garante economia de combustíveis fósseis e redução no custo de produção do cimento. Os pneus são queimados em fornos fechados, onde a borracha sofre combustão total ao contrário do que acontece na queima a céu aberto. As altas temperaturas em torno de 1600°C e atmosfera oxidante no interior do forno propiciam uma combustão completa dos pneus, os materiais voláteis resultados da combustão, como  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  entre outros são matérias-primas úteis e incorpora ao clínquer.

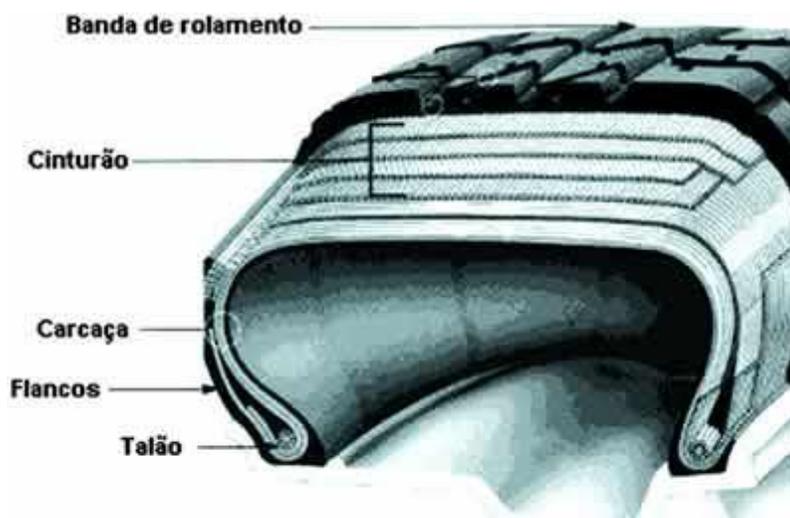


Figura 3.4 - Corte de pneu para veículos de passeio

Fonte: Reciclar é Preciso (2003).

A Tabela 3.15 mostra os resultados dos testes em pneus inservíveis (TDF), picados em flocos de 1,25 cm e 5 cm, com e sem reforço de arame de aço e a Tabela 3.16 mostra o resultado da análise química das cinzas do TDF e do carvão mineral do oriente dos Estados Unidos, para efeito comparativo dos dois combustíveis (Granger e Clark, 1991 apud Amari et al., 1999).

Tabela 3.14 – Análise química de TDF e carvão mineral americano

Tipo do TDF	Poder Calorífico MJ/kg	Concentração % em massa							
		Umidade	Cinzas	S	C	H	N	O	Voláteis
Flocos de borracha de 1,25 cm	32,10	2,26	16,48	1,30	69,74	6,30	0,45	3,40	64,66
Flocos de borracha de 5 cm com arame	31,05	0,75	23,19	1,33	67,00	5,81	0,25	1,64	54,23
Flocos de borracha de 5 cm sem arame	32,58	1,02	8,74	1,23	72,15	6,74	0,36	9,67	67,31
Carvão	28,23	7,76	11,05	2,30	67,69	4,59	1,13	5,47	34,05

Fonte: Adaptado de Granger and Clark (1991).

Tabelas 3.15 – Principais compostos químicos nas cinzas das amostras de TDF e carvão mineral

Análises das cinzas em % de massa				
Compostos	Carvão mineral	Flocos de borracha de 1,25 cm	Flocos de borracha de 5 cm com arame	Flocos de borracha de 5 cm sem arame
SiO <sub>2</sub>	47,98	18,21	5,16	22,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,70	6,99	1,93	9,09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,89	30,93	0,35	1,45
TiO <sub>2</sub>	0,82	6,01	0,14	2,57
CaO	3,30	5,99	0,56	10,64
MgO	0,79	0,73	0,10	1,35
Na <sub>2</sub> O	0,48	1,07	0,13	1,10
K <sub>2</sub> O	2,06	0,55	0,14	0,92
SO <sub>3</sub>	4,33	8,35	0,99	15,38
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,62	0,56	0,10	1,03
ZnO	0,02	20,60	5,14	34,50
Metal	---	---	85,28	---
Total	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Adaptado de Granger and Clark (1991).

### 3.3.4.1 - Formas de alimentação dos pneus

**Pneus inteiros** - O uso de pneus inteiros requer, normalmente, modificações mais onerosas, tanto no seu manuseio, como na alimentação no forno e tem o inconveniente da entrada de ar falso no forno dificultando o controle do processo.

**Pneus picados ou triturados** - O uso de pneus picados ou triturados requer um pré-tratamento. Pneus picados ou triturados podem ser introduzidos no pré-calcinador, onde os pedaços se combinam e queimam com o combustível principal. A introdução dos pneus deve ser feita de forma precisa e controlada, evitando a entrada de ar falso no forno. Os pneus têm, em geral, um poder calorífico superior ao dos carvões, conforme é apresentado na Tabela 3.16. No processo de co-processamento em fornos de cimento não é necessário separar o aço dos pneus, porque nas condições do forno rotativo o ferro oxida completamente e atua como um ingrediente necessário para a formação do clínquer. Os fornos equipados com pré-aquecedores podem queimar pneus inteiros, triturados de 0,3 a 7,0 mm ou cortados em pedaços, em tamanhos que podem variar de 1,25 cm x 1,25 cm; 2,5 cm x 2,5 cm; 5 cm x 5 cm e 10 cm x 10 cm. Alguns autores indicam a conveniência de tamanhos de 2,5 cm x 2,5 cm. Em todos os casos é necessário um sistema de alimentação independente, que pode ser de tipo mecânico ou de fluxo. O sistema de alimentação de fluxo só é aplicável para pneus cortados em pedaços ou triturados, e com alguns problemas de funcionamento, por isso se usam mais os sistemas mecânicos de alimentação. As alternativas mais usuais para alimentação dos pneus são:

- a) Entrada com o combustível principal, só viável para pneus finamente triturados;
- b) Alimentação pelo centro do forno, só viável para fornos longos;
- c) Alimentação pelo pré-calcinador;
- d) Entrada com o cru, pelo o lado extremo contrário a saída do clínquer.

### 3.3.4.2 - Restrições devidas às emissões de poluentes

Hansem 2003 apud Carpio (2003), afirma que mais de 25% da energia térmica utilizada nos fornos rotativos para produção de clínquer é proveniente da queima de pneus, isso só foi possível

após o desenvolvimento de dispositivos para introdução de TDF no pré-calcinador (Santi, 2003). Entretanto existem restrições devidas às emissões de poluentes. Segundo alguns autores os controles existentes sobre as emissões de poluentes nas cimenteiras são suficientes se a queima de pneu não exceder 20% do total de calor requerido no processo. Percentuais maiores que este podem agravar as emissões (a experiência internacional marca um limite máximo de substituição de 20%). Por outro lado, não está sendo considerados a presença nos pneus, de cloro e outros elementos perigosos, assim como diversos metais pesados. Segundo Carpio (2005), atualmente várias indústrias de cimento no Brasil utilizam pneus inservíveis como combustíveis, substituindo aproximadamente até 20% do calor requerido nos fornos. Nos Estados Unidos a Genstar Cement da Califórnia substitui 25% da energia térmica que necessita, queimando 20.000 t/ano de pneus inservíveis. A indústria de cimento da Lafarge na França tem capacidade de queimar até 20.000 t/ano de pneus inservíveis (Ferrer, (1997) apud Carpio, (2005). Na Europa, 40% dos pneus inservíveis são utilizados pelas fábricas de cimento como combustíveis alternativos. A Figura 3.6 mostra um amontoado de pneus no pátio de um fábrica de cimento.



Figura 3.5 – Depósito de pneus no pátio de uma fábrica de cimento.

Fonte: Cement Industry Federation

## 3.4 - ENERGIA ELÉTRICA

O consumo de energia elétrica para movimentação mecânica dos equipamentos de uma fábrica de cimento é de aproximadamente 90 a 120 kWh/t cimento (CEMBUREAU, 1999). A maior parte deste consumo é para moagem final do cimento que pode variar entre 16,5 a 63,5 kWh/t com uma média de 36 kWh/t de cimento (Hackman, et. al apud Tokyay, 1998). Há vários fatores que afetam o consumo de energia elétrica no processo de moagem, entre eles a dureza do clínquer maior que a normal, a granulometria final de cimento, o tipo e eficiência dos moinhos e os percentuais de aditivos ativos permitidos por normas para cada tipo de Cimento Portland.

### 3.4.1 - Consumo de Energia Elétrica nos Processos

Cada tipo de processo de produção de cimento possui peculiaridades próprias, que os levam a terem diferentes consumos de energia elétrica e térmica. A fim de evidenciar estas diferenças, procurou-se obter os valores médios em termos de consumo de energia elétrica para as várias etapas de produção do cimento. Os dados foram obtidos a partir dos catálogos dos produtores de equipamentos, produtores nacionais de cimento e em bibliografias especializadas. Os valores apresentados na Tabela 3.17 foram obtidos considerando a capacidade nominal de produção dos equipamentos apresentadas em catálogos, não se levando em consideração a composição química nem a dureza dos compostos. Isto pode trazer algumas distorções aos resultados, visto que a composição química do clínquer e sua forma de queima podem levá-lo a uma dureza maior que a normal, exigindo maior consumo de energia na moagem. Por outro lado, a variação da granulometria de moagem tanto do cru e principalmente do clínquer, pode acarretar grandes variação no consumo de energia elétrica. Segundo Weber (1963) apud Silva (1994), a alteração da granulometria na moagem do clínquer de 3.000 cm<sup>2</sup>/g para 4.000 cm<sup>2</sup>/g (superfície específica pelo método de Blaine) acarreta um aumento da ordem de 48% no consumo específico de energia elétrica. Os valores apresentados na Tabela 3.17 para consumo na moagem de cimento levam em conta uma granulometria média de 3500 cm<sup>2</sup>/g.

### 3.4.2 - Custo de Energia Elétrica no Processo de Produção

Custo da energia da energia elétrica numa cimenteira representa 10,8% do custo total da produção de cimento (BNDS 1995 apud Bugalho, 1998). É importante ressaltar que o custo da energia representa 30% a 40% do custo total de produção.

Tabela 3.16 - Valores médios de consumo de energia elétrica nas várias etapas de fabricação do Cimento Portland comum em kWh/t de cimento.

ETAPAS	Forno com Pré-aquecedor	Forno com Pré-aquecedor. e pré-calcinador	Consumo Proporcional Por etapa	
Britagem pri. e sec. de calcário,	4,171	4,171		
Britagem de argila	1,020	1,020	5,49%	5,64%
Transporte de M. P.	1,943	1,943		
Moagem do Cru	33,584	33,584	25,85%	26,55%
Homogeneização	4,800	4,800	3,70%	3,79%
Alimentação e exaustão do forno rotativo	17,852	17,700	13,74%	13,99%
Acionamento do forno	5,408	3,000	4,16%	2,37%
Acionam. do soprador de ar primário	1,103	0,964	0,85%	0,76%
Resfriador de clínquer	6,500	6,500	5,00%	5,14%
Transporte de clínquer	2,520	2,520	1,94%	1,99%
Moagem do clínquer	44,722	44,722	34,43%	35,36%
Secagem do carvão	5,629	4,915	4,33%	3,89%
Precipitador eletrostático	0,650	0,650	0,50%	0,51%
Total	129,902	126,489	100,00%	100,00%

Fonte: Silva (1994).

No Brasil as tarifas de energia elétrica são reguladas com homologação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Existem atualmente tarifas regionalizadas para a energia elétrica, com diferenças entre os preços das concessionárias. As tarifas são divididas em três grandes grupos:

Tarifa Convencional,

Tarifa Horó-Sazonal Azul,

Tarifa Horó-Sazonal .

E agrupadas de acordo com a tensão de fornecimento, com tarifas diferenciadas para cada subgrupo, conforme a seguinte classificação:

A1 – Tensão de 230/345 kV

A2 - Tensão de 88/138 kV

A3 - Tensão de 69 kV

A3a - Tensão de 30 a 44 kV

A4 - Tensão de 2,3 a 25 kV

AS – Tensão inferior a 2,3 kV, atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição.

A indústria de cimento compra energia elétrica dentro dos preços da Tarifa Horo-Sazonal Azul, sendo suas fábricas normalmente classificadas dentro do subgrupo A2 uma vez que o consumo intensivo de energia no processo de produção faz com que as concessionárias de energia forneçam a energia elétrica numa tensão mais alta para as fábricas de cimento.

Os valores expressos R\$/MWh, para a região de concessão da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) acessado em 15/12/2008, foram transcritos para a Tabela 3.18.

Tabela 3.17 – Valores das tarifas - Sazonal azul

Segmento Horário	Valores em (R\$/kWh) tarifa sujeita a ICMS			
	Ponta		Fora de ponta	
consumo	Seca	Úmida	Seca	Úmida
A2 - Tensão de 88/138 kV	0,309282	0,279485	0,174638	0,191927
demanda	Demanda	Demanda Ultrapassagem	Demanda	Demanda Ultrapassagem
A2 - Tensão de 88/138 kV	38,056035	114,168105	6,493162	19,479485

Fonte: CEMIG.

## **Capítulo 4**

# **ANÁLISE EXERGÉTICA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO CLÍNQUER**

### **4.1 - INTRODUÇÃO**

A análise de energia em processos industriais baseado na primeira lei da termodinâmica, não dá informação sobre a degradação de energia que acontece no processo. A análise exergética baseada na segunda lei da termodinâmica indica claramente os locais de degradação de energia no processo. O propósito principal da análise de exergia é descobrir e avaliar as causas quantitativamente das imperfeições termodinâmicas dos processos térmicos e químicos, permitindo conhecer os equipamentos nos quais as melhorias de projeto tendem a ser mais significativas. O seu desenvolvimento teórico foi baseado principalmente nos trabalhos de Kotas (1985) e Szargut et al. (1988). Neste trabalho, as aplicações das análises de energia e exergia foram examinadas para dois processos secos de produção de cimento, sendo um com forno rotativo equipado com pré-aquecedor de ciclones de quatro estágios e outro equipado com forno rotativo equipado com pré-aquecedor de ciclones de quatro estágios e pré-calcinador.

## 4.2 - EFICIÊNCIA TÉRMICA CALCULADA PELA 1ª LEI DA TERMODINÂMICA

A eficiência térmica global dos sistemas de produção do clínquer avaliada através do uso da 1ª Lei da Termodinâmica, é obtida pelo quociente entre o consumo específico de calor teórico (calor teórico de reação para formação dos compostos do clínquer) e o consumo específico de calor real, determinado através de um balanço térmico (Fonseca et al., 1990).

Assim, a eficiência térmica dos sistemas de produção de clínquer, com base na 1ª Lei, é definida conforme Equação (4.1).

$$\eta_{1L} = \frac{\Delta H_{th}^{\circ}}{Cec} \quad (4.1)$$

No cálculo do calor teórico de reação ( $\Delta H_{th}^{\circ}$ ) são levados em conta:

- o calor requerido para a calcinação dos carbonatos do cru;
- o calor de desidratação da argila;
- o calor do efeito endotérmico da formação do clínquer;
- a formação de sulfatos alcalinos.

Negligenciando o efeito alcalino, o calor teórico de formação do clínquer ( $\Delta H_{th}^{\circ}$ ) pode ser calculado, a partir da porcentagem dos elementos:  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$  e  $Mn_2O_3$ , presentes na composição do mesmo, e considerados sob a forma de óxidos puros, utilizando a Equação (4.2), desenvolvida por H. Zur Strasse apud (Silva, 1994).

$$\Delta H_{th}^{\circ} = 17,21 \cdot Y_{Al_2O_3} + 27,13 \cdot Y_{MgO} + 32,01 \cdot Y_{CaO} - 21,42 \cdot Y_{SiO_2} - 2,47 \cdot Y_{Fe_2O_3 + Mn_2O_3} \quad (4.2)$$

Alguns dos subsistemas podem ser também analisados pela 1ª Lei. A seguir são apresentadas as definições, para calcular as eficiências térmicas dos subsistemas da instalação, segundo (Silva, 1994).

Para os Volumes de Controle relacionados com os estágios do pré-aquecedor de ciclones, a eficiência térmica é definida pela Equação (4.3):

$$\eta_{1L(v.c)} = \frac{\Delta H_{sólidos}}{\Delta H_{gases}} \quad (4.3)$$

A eficiência para o pré-calcinador e para o forno rotativo é definida pela Equação (4.4):

$$\eta_{1L(Forno\ ou\ pré-cal.)} = \frac{\sum \Delta H_{reação}^{\circ} + \Delta H_{sólidos}}{\Delta H_{cbt}^{\circ} + \Delta H_{ac}} \quad (4.4)$$

Para o caso do resfriador de clínquer, a Eficiência é definida pela Equação (4.5):

$$\eta_{1L(V.C.\ Resf.\ de\ clí.)} = \frac{\Delta H_{ac}}{\Delta H_{clq}} \quad (4.5)$$

Eficiência do Sistema (Eficiência Global), é definida pela Equação (4.6):

$$\eta_{1L(v.c.\ sistema)} = \frac{\sum \Delta H_{reação}^{\circ}}{\Delta H_{cbt}^{\circ}} \quad (4.6)$$

Na Equação (4.6), o calor de reação para a descarbonatação do carbonato de magnésio ( $MgCO_3$ ), do carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ), bem como para as reações de formação dos compostos do clínquer, ou seja,  $C_2S$  ( $2CaO.SiO_2$ ),  $C_3S$  ( $3CaO.SiO_2$ ),  $C_3A$  ( $3CaO.Al_2O_3$ ),  $C_4AF$  ( $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ ), e ainda as reações de formação dos sulfatos alcalinos ( $K_2SO_4$  e  $Na_2SO_4$ ) e o sulfato de cálcio ( $CaSO_4$ ), foi tomado a  $25^{\circ}C$ , para o cálculo da variação de entalpia dos sólidos e dos gases ao longo da instalação.

### 4.3 - CONCEITOS DE EXERGIA

A exergia é o máximo trabalho reversível que pode ser obtido quando dois sistemas, em estados diferentes, são colocados em contato até que encontrem o equilíbrio termodinâmico, quando um desses sistemas é previamente conhecido, denominado ambiente de referência de exergia (Bejan et al,1996). Uma vez especificado o estado do ambiente, pode-se considerar a exergia como sendo uma propriedade do sistema. De forma mais abrangente, pode-se dizer que exergia é a capacidade de realizar trabalho. Ela mede o trabalho mínimo necessário à produção de um bem ou serviço, o que se chama, em análise econômica, de valor agregado. Desconsiderando os efeitos elétricos, magnéticos, nucleares e de interfaces, a exergia total de

uma substância será a soma das exergia cinética, exergia potencial, exergia física e exergia química. A produção de clínquer inclui processos térmicos e químicos, portanto será dado ênfase à exergia térmica, correspondente a soma da exergia física e química.

## 4.4- PROCEDIMENTOS E EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DA EXERGIA

As seguintes hipóteses foram feitas para a análise exergéticas neste trabalho: o calor não está determinado fora do sistema, as energias cinéticas e potenciais dos materiais que entram e saem do sistema foram desprezadas. Assim os valores para a exergia dos sólidos e gases podem ser calculados levando-se em conta a variação da exergia física e química dos compostos sólidos e gasosos.

### 4.4.1 - Equações para Calcular a Exergia dos Gases

Segundo Kotas (1985) os valores para a exergia dos gases podem ser calculados pela Equação (4.7):

$$B_g = n_{m_g} b_{M_g}^o + (T_g - T_o) \cdot \sum_k (n_{g_k} \cdot C_{g_k}^b) \quad (4.7)$$

Onde:

$B_g$  é a exergia dos gases (kJ/s);

$n_{m_g}$  é número de moles da mistura dos gases;

$b_{M_g}^o$  é exergia química da mistura, calculada pela Equação (4.8);

$T_g$  é a temperatura dos gases em K;

$T_o$  é a temperatura do estado de referência em K;

$C_{p_{g_k}}^b$  leva em conta a variação da entalpia e entropia num dado intervalo de temperatura, sendo definido e calculado pela Equação (4.10) (Kotas 1985).

$$b_{M_g}^o = \sum_k (y_{g_k} \cdot b_{g_k}^o) + R \cdot T_o \cdot \sum_k (y_{g_k} \cdot \ln y_{g_k}) \quad (4.8)$$

Onde  $b_{g_k}^o$  é exergia química padrão, definida por Szargut (1988) conforme a Equação (4.9):

$$b_{g_k}^o = \Delta G^o + \sum_{el} n_{el} \cdot b_{el}^o \quad (4.9)$$

$$C_{p_{g_k}}^b = \frac{1}{T_g - T_o} \left[ \int_{T_o}^{T_g} C_{p_k} dT - T_o \int_{T_o}^{T_g} C_{p_k} \frac{dT}{T} \right] \quad (4.10)$$

A composição do gás de combustão necessária ao cálculo da exergia pode ser obtida através de um balanço estequiométrico das reações de combustão do combustível, considerando 2 a 4,5% de oxigênio livre, no sistema de exaustão da instalação. A composição original dos gases de combustão é alterada ao longo da passagem destes pelo interior do sistema forno/pré-calcinador/pré-aquecedor, devido à incorporação do CO<sub>2</sub> oriundo da reação de calcinação do CaCO<sub>3</sub> e da descarbonatação do carbonato de magnésio (Silva, 1994)

#### 4.4.2 - Equações para Calcular a Exergia dos Sólidos

Nos sólidos, a exergia na entrada das instalações é calculada, levando-se em conta a mistura dos óxidos que formam o cru, considerando-se também as suas transformações químicas ocorridas ao longo do interior do forno rotativo, pré-aquecedores, pré-calcinador e resfriador de clínquer. Assim, a exergia da mistura de sólidos é calculada pela Equação (4.11):

$$B_s = n_{m_s} \cdot b_{M_s}^o + \sum_k n_k \cdot [(h - h_o) - T_o(s - s_o)]_k \quad (4.11)$$

Onde:

$n_{m_s}$  é o número total de moles dos sólidos;

$b_{M_s}^o$  é a exergia química;

$n_k$  é o número de moles de cada substância.

A variação de entalpia e entropia dos compostos químicos em função da temperatura é calculada pelas Equações (4.12) e (4.13), considerando  $T_0 = 298,15$  K.

$$h - h_o = \int_{T_o}^{T_s} C p_k \cdot dT \quad (4.12)$$

$$s - s_o = \int_{T_o}^{T_s} C p_k \cdot \frac{dT}{T} \quad (4.13)$$

Substituindo as Equações (4.12) e (4.13) em (4.11), tem-se a Equação (4.14):

$$B_s = n_{m_s} \cdot b_{M_s}^o + \sum n_k \cdot \left[ \int_{T_o}^{T_s} C p_k \cdot dT - T_o \int_{T_o}^{T_s} C p_k \cdot \frac{dT}{T} \right]_k \quad (4.14)$$

A variação de entalpia e entropia dos compostos químicos que entra na composição do clínquer, em função da temperatura, é calculada pelas Equações (4.15) e (4.16).

$$h - h_o = (A \cdot T_s + B \cdot T_s^2 \cdot 10^{-3} + C \cdot T^{-1} \cdot 10^5 + D) \cdot 4,186 \quad (4.15)$$

$$s - s_o = \left[ A \cdot \ln \frac{T_s}{T_o} + 2 \cdot B \cdot 10^{-3} \cdot (T_s - T_o) + \frac{C}{2} \cdot 10^{-5} \cdot \left( \frac{1}{T_s^2} - \frac{1}{T_o^2} \right) \right] \cdot 4,186 \quad (4.16)$$

Onde: A; B; C; D, são constantes levantadas por Carvalho et al. (1977), ver Tabela 4.2.

Neste trabalho os valores relativos aos calores específicos dos compostos, utilizados nos cálculos da exergia dos gases, da farinha e do clínquer, foram obtidos a partir dos dados reportados por Carvalho et al. (1977) e Perry and Chilton (1982). Já os dados relativos à exergia química padrão foram obtidos de Szargut et al. (1988).

## 4.5 - DEFINIÇÃO DA EFICIÊNCIA RACIONAL

Eficiência racional é um critério de desempenho para um componente ou para uma instalação. A eficiência racional é definida por Kotas (1985), conforme a Equação (4.17):

$$\psi = \frac{(B_{saída} - B_{entrada})_S}{(B_{entrada} - B_{saída})_g} \quad (4.17)$$

Segundo Silva (1994), nos sistemas de produção de clínquer a eficiência exergética é calculada através do quociente entre a exergia adicionada à corrente fria de sólidos, pela corrente quente de gases, no interior dos pré-aquecedores, pré-calcinadores e fornos rotativos. Nos resfriadores de clínquer, a corrente quente passa a ser representada pelos sólidos e a corrente fria pelo ar de resfriamento, sendo uma parte deste aproveitado como ar de combustão, ou seja, ar primário, ar secundário e/ou ar terciário em instalações com pré-calcinador, sendo estes, aquecido acima de 700 °C.

A eficiência global dos sistemas é obtida pelo quociente entre a exergia adicionada ao material (transformação do cru em clínquer) durante todo o processo, e a exergia liberada pela queima de um combustível (Silva, 1994). Nas instalações analisadas neste trabalho existe o aproveitamento de parte da exergia contida nos gases de exaustão dos sistemas, os quais são utilizados para secagem dos materiais dentro dos moinhos de cru e secagem dos combustíveis sólidos. Assim, assumindo a existência de duas correntes distintas dentro de um volume de controle, representado neste caso por uma instalação completa de produção de clínquer, ou de seus subsistemas, isto é, corrente de gases e corrente de sólidos.

## 4.6 - DADOS UTILIZADOS NO CÁLCULO DA ANÁLISE E DA EFICIÊNCIA EXERGÉTICA

Os principais compostos que entram na composição da farinha para formação do clínquer, são apresentados na Tabela 4.1. Traços de outros elementos presentes serão desprezados neste trabalho para efeito de cálculo da exergia, devido a sua baixa concentração. A Tabela 4.1 apresenta também os principais compostos do clínquer.

Tabela 4.1 - Principais componentes da farinha e do clínquer.

Compostos presentes na farinha	Compostos presentes no clínquer	Nomenclatura da química do cimento
CaCO <sub>3</sub>	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S - silicato tricálcico
SiO <sub>2</sub>	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S - silicato dicálcico
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A - aluminato tricálcico
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF - ferro aluminato tetra-cálcico.
MgCO <sub>3</sub>	MgO	MgO - periclásio
SO <sub>3</sub>	CaO livre	CaO - cal livre
K <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - sulfato alcalino
Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - sulfato alcalino
TiO <sub>2</sub>	CaSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub> - sulfato de cálcio
H <sub>2</sub> O	---	---

Fonte: Silva (1994)

As constantes utilizadas nas Equações (4.15) e (4.16) levantadas por Carvalho et al (1977), e a exergia química padrão (Szargut, 1988), são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Coeficientes utilizados nas Equações (4.15) e (4.16) e valores da exergia química padrão (b<sup>0</sup>).

Compostos	A	B	C	D	b <sup>0</sup> kJ/kmol
CaCO <sub>3</sub>	24,98	2,62	6,20	-9.760,0	1.000,0
SiO <sub>2</sub> <sup>*</sup>	11,22	4,10	2,70	-4.615,0	1.900,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,49	1,41	8,38	-11.132,0	200.400,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>**</sup>	23,49	9,30	3,55	-9.021,0	16.500,0
MgCO <sub>3</sub>	18,62	6,90	4,16	-7.560,0	37.900,0
SO <sub>3</sub>	13,90	3,05	3,22	-5.495,0	249.100,0
K <sub>2</sub> O <sup>***</sup>	16,40	0,00	0,00	--	413.100,0
Na <sub>2</sub> O	15,70	2,70	0,00	-4.921,0	296.200,0
TiO <sub>2</sub>	17,97	0,14	4,35	-6.829,0	21.400,0
H <sub>2</sub> O	18,04	0,00	0,00	-5.379,0	900,0

Fonte: Carvalho et al. (1977), Perry and Chilton (1982), Szargut et al. (1988), apud Silva, (1994)

Observações:

\* - T<sub>s</sub> > 848°C: A=14,41; B=0,97; C=0,00; D=-4.455,00.

\*\* - T<sub>s</sub> > 1050°C: A=31,71; B=0,88; C=0,00; D=-8.446,00.

950 < T<sub>s</sub> < 1050°C: A=36,00; B=0,0; C=0,0; D=-9.021,0

\*\*\* - As Equações (4.15) e (4.16) devem ser substituídas pelas integrais de

C<sub>p</sub>= A + BT - CT<sup>2</sup>, em relação a dT para entalpia e dT/T para entropia.

Para o cálculo da exergia do clínquer, utilizam-se as Equações (4.15) e (4.16), e os coeficientes apresentados na Tabela 4.3. Para o cálculo da exergia dos gases, leva-se em conta uma mistura de oito gases, desconsiderando  $\text{NO}_x$  devido sua concentração ser muito baixa e existir imprecisão na sua estimativa. A exergia química padrão para os gases e os valores para o cálculo da variação de entalpia e entropia com a temperatura, são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 - Coeficientes utilizados nas Equações (4.15) e (4.16) e valores da exergia química padrão para o clínquer.

Compostos do Clínquer	A	B	C	D	$b^0$ kJ/kmol
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2^* - \text{C}_2\text{S}$	34,87	4,87	6,26	-12929,0	95700,0
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - \text{C}_3\text{S}$	49,85	4,31	10,15	-18651,0	219800,0
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}_3\text{A}$	62,28	2,29	12,01	-22801,0	500600,0
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{C}_4\text{AF}$	110,07	2,49	23,18	-40814,0	644284,0
MgO	10,18	0,87	1,48	-3609,0	66800,0
CaO - Cal livre	11,67	0,54	1,56	-4051,0	110200,0
$\text{K}_2\text{SO}_4^{**}$	28,77	11,09	4,26	-11064,0	35000,0
$\text{Na}_2\text{SO}_4^{***}$	14,97	26,45	0,00	-6815,0	296200,0
$\text{TiO}_2$	17,97	0,14	4,35	-6829,0	21400,0
$\text{CaSO}_4^{****}$	18,52	0,02197	156800,0	---	8200,0

Fonte: Carvalho et al. (1977), Perry and Chilton (1982), Szargut et al. (1988), apud Silva, (1994)

Observações:

\* -  $T_s > 970^\circ\text{C}$ : A=32,16; B=5,51; C=0,0; D=-9814,0. \*\* -  $T_s > 856^\circ\text{C}$ : A=33,60; B=6,70; C=0,0; D=-8747,0.

\*\*\* -  $514^\circ\text{C} < T_s < 1157^\circ\text{C}$ : A=26,06; B=9,67; C=0,0; D=-7837,0.

$T_s > 1157^\circ\text{C}$ : A=47,18; B=0,00; C=0,0; D=-10190,0.

\*\*\*\* - Para o cálculo da entalpia e entropia utilizam-se os valores de  $C_p$ , dados pela integração de  $C_p = A + B.T - C.T^{-2}$ .

Tabela 4.4 - Exergia química padrão e coeficientes utilizados no cálculo da entalpia e entropia dos gases.

Compostos dos Gases	A	B	C	D	$b^0$ kJ/kmol
CO <sub>2</sub>	10,57	1,05	2,06	-3936,0	19870,0
H <sub>2</sub> O	7,30	1,23	0,00	-2286,0	9500,0
SO <sub>2</sub>	11,04	0,94	1,84	-3992,0	313400,0
O <sub>2</sub>	7,16	0,50	0,40	-2313,0	3970,0
N <sub>2</sub>	6,83	0,45	0,12	-2117,0	720,0
K <sub>2</sub> O*	26,20	0,00	0,00	---	413100,0
Na <sub>2</sub> O	15,70	0,00	0,00	-4921,0	296200,0

Fonte: Carvalho et al. (1977), Perry and Chilton (1982), Szargut et al. (1988), apud Silva, (1994)

\* - Para o cálculo, utilizam-se os valores de  $C_p$ , calculados a partir da integral de  $C_p = A + B.T - C.T^{-2}$

## 4.7 - ANÁLISE DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE CLÍNQUER COM FORNO ROTATIVO DE VIA SECA COM PRÉ-AQUECEDOR DE QUATRO ESTÁGIOS.

Neste capítulo os dados do sistema analisado, referem-se a uma fábrica de cimento no Brasil. O sistema é composto por um forno rotativo sistema seco com as seguintes características:

- diâmetro na zona de clínquerização - 5,00 m;
- comprimento da parte rotativa do forno - 80,00 m;
- inclinação do forno - 3,0%;
- velocidade em operação normal - 1,7 rpm, velocidade máxima - 2,2 rpm;
- pré-aquecedor de ciclones de quatro estágios em série;
- o resfriador do clínquer é do tipo satélites com aproximadamente 70% de eficiência.

A capacidade produtiva nominal da instalação é de 2000 t/dia de clínquer, operando com uma mistura de combustíveis sólidos pulverizados. A taxa de alimentação de combustível em energia requerida no forno é apresentada na Tabela 4.5. Para análise desta instalação foi utilizada a mistura de combustíveis, denominada MIX-A, cuja composição química elementar individual dos combustíveis é apresentada na Tabela 5.6. A Tabela 5.7 apresenta a composição química das cinzas dos combustíveis. Os dados utilizados relativos à composição dos sólidos, gases, bem

como as temperaturas relativas a vários pontos da instalação, são reais e foram obtidos em uma importante fábrica de cimento no Brasil. O consumo específico de calor no sistema é da ordem de 3605 kJ/kg de clínquer produzido.

Tabela 4.5 - Percentual das misturas de combustíveis em energia requerida.

Combustíveis	MIX-A Composição %	MIX-B Composição %	MIX-C Composição %
Moinha de carvão vegetal	50,00	54,93	50,41
Carvão mineral	15,00	---	---
Coque de petróleo importado	20,00	25,57	36,25
Coque de petróleo nacional	15,00	---	
Raspas de pneus	0,00	19,5	13,34
Total	100,00	100,00	100,00

Tabela 4.6 - Composição química elementar individual dos combustíveis, em % de peso.

Componentes		Moinha de carvão vegetal	Carvão mineral	Coque de petróleo importado	Coque de petróleo nacional	Raspas de pneus
Carbono	C	70,64	70,12	87,97	97,83	72,15
Hidrogênio	H	3,21	4,51	3,31	0,36	6,74
Enxofre	S	0,29	1,28	4,69	0,96	1,23
Oxigênio	O	---	1,13	0,90	---	9,67
Nitrogênio	N	1,02	2,25	1,52	---	0,36
Água higroscópica	H <sub>2</sub> O	1,78	0,85	0,30	0,36	1,02
Cinzas	CZ	23,00	19,85	1,09	0,48	8,74
Voláteis	MV	22,29	33,60	11,30	8,71	67,31
PCI (kJ/kg)	PCI	21648	26928	33974	34930	32580

Fonte: Adaptado, Assis (2008), Silva (1994), Amari (1999), Granger and Clark (1991).

Tabela 4.7 - Composição química das cinzas dos combustíveis utilizados, % em massa.

Componentes		Moinha de carvão vegetal %	Carvão mineral %	Coque de petróleo %	Raspas de pneus %
Óxido de cálcio	CaO	52,3	4,4	---	10,64
Dióxido de silício	SiO <sub>2</sub>	33,8	47	52,6	22,00
Óxido de alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,3	24	32,9	9,09
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	11,2	---	1,45
Óxido de magnésio	MgO	7,6	2,7	1,3	1,35
Trióxido de enxofre	SO <sub>3</sub>	---	4,2	---	15,38
Potássio	Na <sub>2</sub> O	---	3,8	---	1,10
Sódio	K <sub>2</sub> O	---	0,8	---	0,92
Óxido de fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	---	---	---	1,03
Óxido de zinco	ZnO	---	---	---	34,50
Outros	---	4,0	1,9	0,1	---

Fonte: Adaptado, Assis, (2008), ABCP, (2002), Granger and Clark (1991)

#### 4.7.1 - Composição Química do Clínquer

A Tabela 4.8 apresenta a composição química realizada por análise durante o processo de fabricação em uma fábrica de cimento Portland no Brasil.

Tabela 4.8 - Composição química do clínquer.

Compostos	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Resto
Porcentagens	66,42	0,69	20,78	4,06	5,11	0,5	2,44

##### 4.7.1.1 - Composição dos principais compostos do clínquer

As porcentagens em peso dos principais compostos do clínquer foram calculadas pelo método da composição potencial de Bogue (1952), conforme as Equações (4.18), (4.19), (4.20), (4.21) e fazendo as seguintes considerações:

- O enxofre introduzido no processo junto com os sólidos está sob a forma de SO<sub>3</sub>, sendo absorvido nas reações ocorridas com os álcalis e CaO no forno rotativo;

- b) O SO<sub>2</sub> formado a partir do enxofre contido no combustível reage parcialmente com os álcalis e óxido de cálcio, formando sulfatos alcalinos e de cálcio. Supõe-se, ainda, que todas estas reações ocorram apenas no interior do forno rotativo;
- c) Todas as cinzas oriundas da queima do MIX-A de combustíveis são incorporadas ao clínquer, fazendo parte das fases do mesmo.

$$C_3S = 4,07X_{CaO} - (7,6X_{SiO_2} + 6,72X_{Al_2O_3} + 1,43X_{Fe_2O_3} + 2,85X_{SO_3}) \quad (4.18)$$

$$C_3S = 4,07 \times 65,91 - (7,6 \times 20,83 + 6,72 \times 5,53 + 1,43 \times 3,32 + 2,85 \times 1,2) = 70,83\%$$

$$C_2S = 2,87X_{SiO_2} - 0,754X_{C_3S} \quad (4.19)$$

$$C_2S = 2,87 \times 20,83 - 0,754 \times 64,62 = 6,23\%$$

$$C_3A = 2,65X_{Al_2O_3} - 1,69X_{Fe_2O_3} \quad (4.20)$$

$$C_3A = 2,65 \times 5,53 - 1,69 \times 3,32 = 6,68\%$$

$$C_4AF = 3,04X_{Fe_2O_3} \quad (4.21)$$

$$C_4AF = 3,04 \times 3,32 = 12,34\%$$

## 4.7.2 - Análise Exergética Para Produção de Clínquer Utilizando o Combustível MIX-A

### 4.7.2.1- Principais características técnicas do processo de produção

- Produção de clínquer: 1924 t/dia correspondente a 22,269 kg/s
- Alimentação de farinha no 1º estagio: 34,152 kg/s
- Calor de formação: 1777,189 kJ/kg clínquer
- Poder calorífico inferior dos combustíveis MIX-A: Tabela 4.6
- Consumo específico de calor: 3605 kJ/kg clínquer
- Consumo de combustível: 3,1187 kg/s (Tabela 4.9)
- Módulo de Alumina da farinha, MA = 1,26
- Módulo Sílica da farinha, MS = 2,28
- Fator de Saturação de cal da farinha, FSC = 91,93
- Módulo de Alumina do clínquer, MA = 1,26

- Módulo Sílica do clínquer, MS = 2,27
- Fator de Saturação de cal do clínquer, FSC = 98,68
- Cal livre: 0,47%

#### 4.7.2.2 - Combustão

A Tabela 4.9 apresenta o resultado dos cálculos para o consumo de cada combustível, levando em conta a proporção do consumo de calor. A Tabela 4.10 apresenta a quantidade de cada substância em kmol/s para produção de 22,269 kg de clínquer por segundo.

Tabela 4.9 - Consumo de combustíveis em kg/s para produção de 22,269 kg/s de clínquer

Combustível	Composição %	PCI kJ/kg	CeC kJ/kg	Consumo Combustível kg/s
Moinha Carvão Vegetal	50,00	21648	1802,50	1,854207
Carvão Mineral	15,00	26928	540,75	0,447191
Coque Importado	20,00	33974	721,00	0,472595
Coque Nacional.	15,00	34930	540,75	0,344745
Total	100,00	---	3605,00	3,118739

Tabela 4.10 - Quantidade de cada substância em kmol/s para produção de 22,269 kg/s

COMBUSTÍVEL	SUBSTÂNCIAS					
	C	H <sub>2</sub>	S	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Moinha Carvão Vegetal.	0,109151	0,029760	0,000168	---	0,000675	0,001834
Carvão Mineral.	0,026131	0,010084	0,000179	0,000158	0,000359	0,000211
Coque Importado.	0,034645	0,007821	0,000693	0,000133	0,000257	7,88E-05
Coque Nacional.	0,028105	0,000621	0,000103	---	---	6,89E-05
<b>Total</b>	<b>0,198032</b>	<b>0,048286</b>	<b>0,001143</b>	<b>0,000291</b>	<b>0,00129</b>	<b>0,002192</b>

#### Balanceamento estequiométrico

O<sub>2</sub> Necessário para combustão:

+0,198032 → O<sub>2</sub> de CO<sub>2</sub>

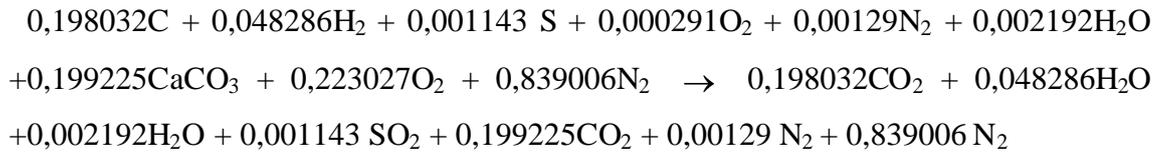
+0,048286/2 → O<sub>2</sub> de H<sub>2</sub>O

+0,001143 → O<sub>2</sub> de SO<sub>2</sub>

- 0,000291 → O<sub>2</sub> do combustível

0,223027 kmol/s

Equação estequiométrica:



**O<sub>2</sub> livre** - O O<sub>2</sub> livre pode-se ser calculado pela Equação (4.22):

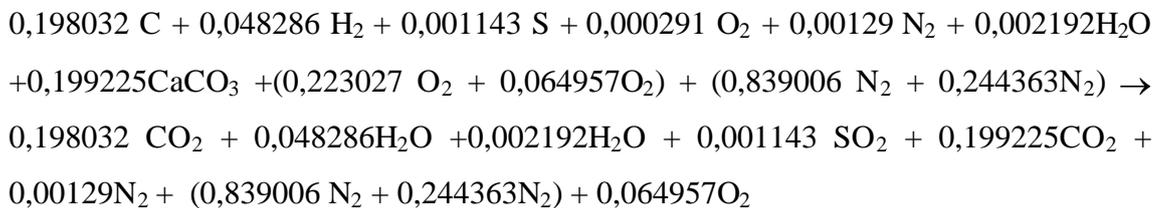
$$\% \text{ de } O_2 \text{ livre} = \frac{O_2 \text{ livre}}{(n_T - n_{H_2O}) + 4,76 \cdot O_{2\text{livre}}} \quad (4.22)$$

Considerando um excesso de ar correspondente a 4,2% de O<sub>2</sub> livre tem-se:

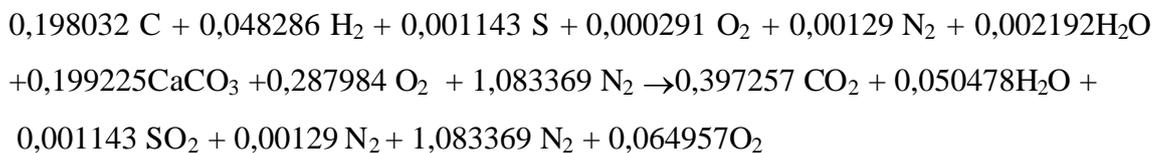
$$0,042 = \frac{O_2 \text{ livre}}{0,198032 + 0,001143 + 0,199225 + 0,839006 + 4,76 \cdot O_{2\text{livre}}}$$

Resolvendo a equação vem: 0,064957 kmol/s de O<sub>2</sub> livre → 0,244363 kmol/s de N<sub>2</sub>

A equação de combustão corrigida com 4,2% de O<sub>2</sub> livre, será:



Reagrupando:



Ar: 0,287984 O<sub>2</sub> + 1,083369 N<sub>2</sub> kmol/s

Ar primário 15% : 0,043198 O<sub>2</sub> + 0,162505 N<sub>2</sub> kmol/s

Ar secundário 85% : 0,244786 O<sub>2</sub> + 0,920863 N<sub>2</sub> kmol/s.

### 4.7.2.3 - Fluxo de gases e sólidos

Como no processo de fabricação de clínquer ocorrem reações químicas, as relações das massas que entram e saem dos volumes de controles foram transformadas em kmol/s. O principal motivo para isto é que os calores específicos e de formação das substâncias são tabelados em unidade molar.

Para a manipulação de dados e cálculos matemáticos foram utilizados os programas Excel e o Mathcad.

As composições molares dos gases à saída do forno rotativo, do 4º estágio, 3º estágio e 1º estágio, bem como a quantidade de ar primário e de ar secundário para a combustão, são apresentadas na Tabela 4.11. O volume de ar necessário à combustão foi calculado levando-se em conta uma porcentagem de 4,2% de  $O_2$  livre presente nos gases, na base seca. O  $CO_2$  oriundo da calcinação do carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) e da descarbonetação do carbonato de magnésio ( $MgCO_3$ ), é somado à composição dos gases de combustão, assim como o vapor de água oriundo da umidade do cru. O ar primário é introduzido no queimador a 59 °C e corresponde a 15% do total do ar necessário a combustão. O ar secundário é introduzido no forno pré-aquecido a 700 °C, devido à troca de calor no resfriador de clínquer, e corresponde a 85% do total do ar necessário a combustão.

Tabela 4.11 - Composição elementar dos gases, ar primário e ar secundário aquecido no resfriador de clínquer, em kmol/s.

Gás	Saída do Primeiro Estágio	Saída do Terceiro Estágio	Saída do Quarto Estágio	Saída do Forno	AR Primário	AR Secundário
CO <sub>2</sub>	0,502194	0,502194	0,463665	0,397257	---	---
H <sub>2</sub> O	0,071801	0,050478	0,050478	0,050478	---	---
SO <sub>2</sub>	0,001143	0,001143	0,001143	0,001143	----	----
O <sub>2</sub>	0,064957	0,064957	0,064957	0,064957	0,043198	0,244786
N <sub>2</sub>	1,084659	1,084659	1,084659	1,084659	0,162505	0,920863

O fluxo da farinha para entrada do 1º ao 4º estágio e entrada do forno, considerando a incorporação de cinzas proveniente da queima do combustível, bem como o número de moles são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Composição química elementar da farinha e do clínquer, em kmol/s. para produção de 22,265 kg/s de clínquer em forno com pré-aquecedor de 4 estágios.

Compostos da farinha e clínquer	Massa da farinha kg/s	PM (kg/kmol)	Entrada 1º estágio 60 °C	Entrada 4º estágio 700 °C	Entrada no forno 800 °C	Saída do forno 1365 °C	Massa do clínquer kg/s
CaCO <sub>3</sub>	26,563318	100	0,265633	0,265633	0,199225	---	---
SiO <sub>2</sub>	4,678127	60	0,077969	0,077969	0,077969	---	---
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,146669	102	0,011241	0,011242	0,011242	---	---
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,907486	160	0,005672	0,005672	0,005672	---	---
MgCO <sub>3</sub>	0,327117	84	0,003894	0,000000	---	---	---
SO <sub>3</sub>	0,249735	80	0,003122	0,003122	0,003122	---	---
Na <sub>2</sub> O	0,014069	62	0,000227	0,000227	0,000227	---	---
K <sub>2</sub> O	0,239182	94	0,002544	0,002544	0,002544	---	---
CaO	---	56	---	---	0,066408	---	---
MgO	---	40	---	0,003894	0,003894	0,003894	0,155770
C <sub>2</sub> S	---	172	---	---	---	0,009867	1,697209
C <sub>3</sub> S	---	228	---	---	---	0,068101	15,527093
C <sub>3</sub> A	---	270	---	---	---	0,005570	1,503916
C <sub>4</sub> AF	---	486	---	---	---	0,005672	2,756489
CaSO <sub>4</sub>	---	136	---	---	0,0003280	0,000328	0,044608
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	---	142	---	---	---	0,000227	0,032224
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	---	174	---	---	---	0,002544	0,442742
CaI livre	---	56	---	---	---	0,001869	0,104664
Soma	34,125704	---	0,370303	0,370303	0,370631	0,098073	22,264716

#### 4.7.2.4 - Cálculo da exergia dos fluxos

Para efeito do cálculo da exergia dos fluxos de sólidos e gases, o sistema foi subdividido em seis volumes de controle, sendo: quatro volumes de controle para o pré-aquecedor, um volume de controle para o forno rotativo e um volume de controle para o resfriador de clínquer. Para o cálculo da eficiência foi considerado mais dois volumes de controle. O primeiro engloba os três primeiros estágios do pré-aquecedor e o segundo engloba o forno rotativo e o quarto estágio do pré-aquecedor, onde ocorrem as principais reações do processo. A Figura 4.1 mostra um esquema dos volumes de controle com os fluxos dos sólidos e gases, e a Figura 4.2 os dados relativos às temperaturas de operação em alguns pontos da instalação. A Tabela 4.13 apresenta os resultados dos cálculos das exergias.

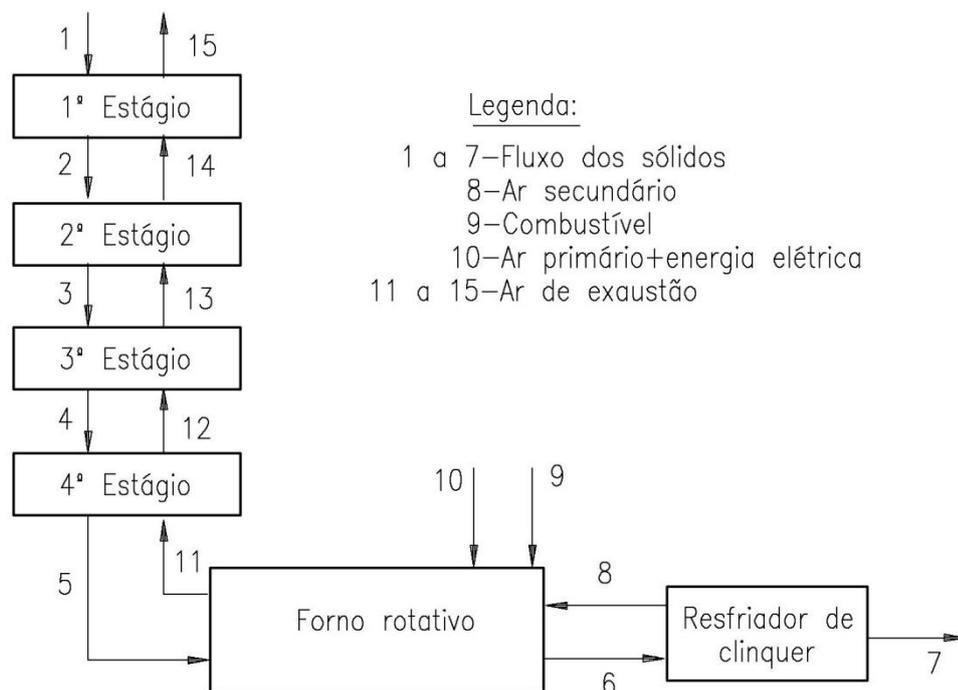


Figura 4.1 – Volumes de controle para a instalação do forno rotativo com pré-aquecedor de quatro estágios.

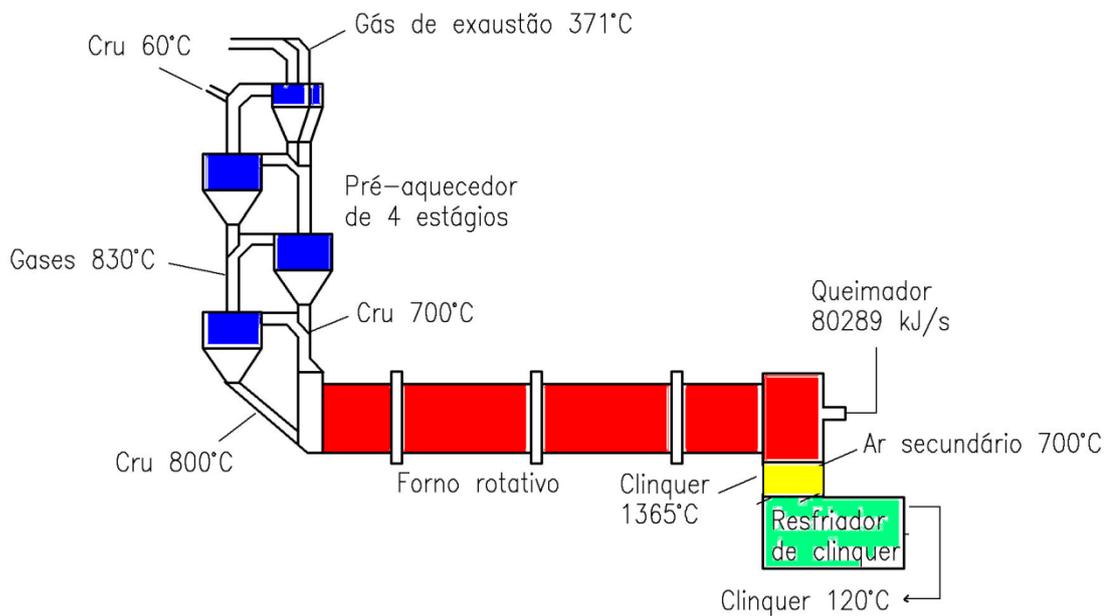


Figura 4.2 – Esquema da instalação, indicando as temperaturas de operação em alguns pontos da instalação.

Tabela 4.13 – Resultado dos cálculos de exergia para a instalação do forno rotativo com pré-aquecedor de quatro estágios, para uma produção de 22,269 kg/s de clínquer.

SÓLIDOS			GASES		
Fluxo	Temperatura K	Exergia kW	fluxo	Temperatura K	Exergia kW
1	333,15	4858,77	8	973,15	14900,94
2	603,15	8089,77	9	---	80280,00
3	785,15	12078,40	10	332,15	157,55
4	973,15	17102,80	11	1383,15	43123,67
5	1073,15	25555,20	12	1103,15	32399,72
6	1638,15	42490,30	13	940,15	25872,61
7	393,15	23210,40	14	810,15	20373,56
---	---	---	15	644,15	14265,31

#### 4.7.2.5 - Eficiência térmica do sistema

Utilizando os valores calculados para entalpia e exergia e as Equações apresentadas nos Itens 5.2 e 5.5 para o cálculo das eficiências da 1ª Lei e da Eficiência Racional, substituindo-se os valores correspondentes a cada volume de controle, foram calculadas as eficiências do sistema cujos resultados são mostrados na Tabela 4.14.

#### Cálculo da eficiência térmica global dos sistemas através do uso da 1ª Lei.

O consumo específico de calor (Cec), levando em conta as perdas de calor originadas no processo, foi de 3605 kJ/kg de clínquer. Utilizando a Equação (4.2), calcula-se  $\Delta H_{th}^o$ :

$$\Delta H_{th}^o = 17,21 \times 5,53 + 27,13 \times 1,45 + 32,01 \times 65,91 - 21,42 \times 20,83 - 2,4 \times 3,32 = 1790,14 \text{ kJ/kg cliq}$$

Entrando com os valores na Equação (4.1), vem:

$$\eta_{1L} = \frac{\Delta H_{th}^o}{Cec} = \frac{1790,14}{3605} = 0,4966 = 49,66\%$$

**Eficiência Racional** - Os resultados dos cálculos das eficiências baseados na Primeira Lei e na Segunda Lei (Eficiência Racional) são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Resultados dos cálculos das eficiências térmica baseada na 1ª Lei e na 2ª Lei

Volume de Controle	Eficiência pela 1ª Lei $\eta_{IL}$	Eficiência pela 2ª Lei (Eficiência Racional $\psi$ )
1º Estágio	88,49%	52,90%
2º Estágio	84,02%	72,53%
3º Estágio	82,41%	76,98%
Pré-aquecedor (do 1º ao 3º Estágio)	84,14%	67,52%
4º Estágio	89,11%	78,82%
Forno Rotativo	62,23%	32,43%
Forno Rotativo + 4º Estágio	68,69%	40,34%
Resfriador de Clínquer	84,80%	76,34%
Eficiência Global	49,66%	22,65%

### 4.7.3 - Análise Exergética Para Produção de Clínquer Utilizando o Combustível MIX- B

A segunda instalação analisada possui um forno rotativo com pré-aquecedor de quatro estágios com características idênticas ao do item anterior, porém está equipada com queimador e dispositivos para o co-processamento de pneus. A capacidade máxima de produção é de 2000 toneladas de clínquer por dia e o consumo específico de 3758,2 kJ/kg de clínquer.

A taxa de alimentação de combustível em energia requerida no forno é apresentada na Tabela 4.5. Para análise desta instalação foi utilizada a mistura de combustíveis, denominada MIX-B, cuja composição química elementar individual dos combustíveis é apresentada na Tabela 4.6. A Tabela 4.7 apresenta a composição química das cinzas dos combustíveis.

#### 4.7.3.1- Principais características técnicas do processo de produção

- Produção de clínquer: 1706,4 t/dia correspondente a 19,75 kg/s
- Alimentação de farinha no 1º estágio: 30,266 kg/s
- Calor de formação: 1777,189 kJ/kg clínquer
- Poder calorífico inferior dos combustíveis MIX-B: Tabela 4.6

- Consumo específico de calor: 3758,2 kJ/kg clínquer
- Consumo de combustível: 2,886276 kg/s (Tabela 4.16)
- Módulo de Alumina da farinha, MA = 1,265
- Módulo Sílica da farinha, MS = 2,28
- Fator de Saturação de cal da farinha, FSC = 99,92
- Módulo de Alumina do clínquer, MA = 1,26
- Módulo Sílica do clínquer, MS = 2,27
- Fator de Saturação de cal do clínquer, FSC = 98,68
- Cal livre 0,53%

#### 4.7.3.2 - Combustão

Procedimento dos cálculos para a mistura MIX-B, com 19,5% do calor necessário para produção de 19,75 kg/s de clínquer, derivado de combustível alternativo pelo processo de co-processamento de pneus inservíveis.

Energia requerida para produção de 1kg de clínquer no forno com pré-aquecedor de quatro estágio é de 3758,2 kJ/kg.

Energia requerida para o pneu =  $0,195 \times 3758,2 = 732,849$  kJ/kg;

Poder calorífico do pneu: 32580 kJ/kg;

Consumo específico de pneu  $C_{pneu}$ :

$$C_{pneu} = \frac{732,849}{32580} = 0,022494 \text{ kg}_{comb.}/\text{kg}_{clínq.}$$

O consumo de pneu para produção de 19,75 kg/s de clínquer:

$19,75 \times 0,022494 = 0,444253$  kg/s. Os cálculos dos demais combustíveis obedecem à mesma sistemática e os resultados estão apresentados na Tabela 4.16

A partir dos dados dos combustíveis apresentados na Tabela 4.6, na Tabela 4.7 e do consumo de combustível apresentado na Tabela 4.15, foi calculada a quantidade de cada

substância em kmol/s para produção de 19,75 kg de clínquer por segundo, os resultados dos cálculos estão apresentados na Tabela 4.16

Tabela 4.15 - Consumo de combustíveis em kg/s para produção de 19,75 kg/s de clínquer.

Combustíveis	MIX-B Composição %	PCI kJ/kg	CeC kJ/kg	Consumo Combustível kg/s
Carvão vegetal	54,93	21648,00	2064,379	1,883384
Coque importado	25,57	33974,00	960,972	0,558639
Rasps de pneus	19,50	32580,00	732,849	0,444253
Total	100,00	---	3758,200	2,886276

Tabela 4.16 - Quantidade dos elementos em kmol/s para produção de 19,75 kg/s de clínquer.

COMBUSTÍVEL	SUBSTÂNCIAS					
	C	H <sub>2</sub>	S	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Carvão Vegetal.	0,110869	0,030228	0,000170	0,000000	0,000686	0,001862
Coque Importado.	0,040953	0,009245	0,000819	0,000157	0,000303	0,000093
Rasps de pneus	0,026711	0,014971	0,000171	0,001384	0,000057	0,000252
<b>Total</b>	<b>0,178532</b>	<b>0,054445</b>	<b>0,001160</b>	<b>0,001541</b>	<b>0,001046</b>	<b>0,002207</b>

### Balanceamento Estequiométrico

O<sub>2</sub> Necessário para combustão:

+0,178532 → O<sub>2</sub> de CO<sub>2</sub>

+ 0,054445/2 → O<sub>2</sub> de H<sub>2</sub>O

+0,001160 → O<sub>2</sub> de SO<sub>2</sub>

-0,001541 → O<sub>2</sub> do combustível

0,205374 kmol/s

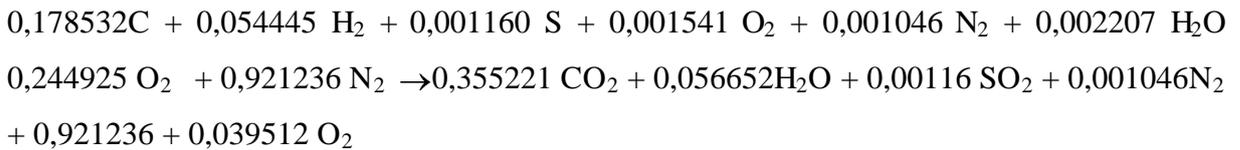
$$0,178532C + 0,054445 H_2 + 0,001160 S + 0,001541 O_2 + 0,001046 N_2 + 0,002207 H_2O + (0,205374 O_2 + 0,039512) + (0,772597 N_2 + 0,148639N_2) \rightarrow 0,178532 CO_2 + 0,054445H_2O + 0,002207H_2O + 0,001160 SO_2 + 0,1766892CO_2 (CaCO_3) + 0,001046N_2 + (0,772597 N_2 + 0,148639N_2) + 0,0395512 O_2$$

**Cálculo do O<sub>2</sub> livre** - Considerando um excesso de ar correspondente a 3,0% de O<sub>2</sub> livre e substituindo os valores na Equação (4.22), tem-se:

$$0,03 = \frac{O_{2 \text{ livre}}}{0,178532 + 0,00116 + 0,1766892 + 0,7725957 + 4,76 \cdot O_{2 \text{ livre}}}$$

Resolvendo a Equação, resulta: 0,039512 kmol/s de  $O_2$  livre  $\rightarrow$  0,148639 kmol/s de  $N_2$

A Equação de combustão corrigida com 3% de  $O_2$  livre será:



Ar: 0,244886  $O_2$  + 0,921238  $N_2$  kmol/s

Ar primário 15% : 0,036733  $O_2$  + 0,138186  $N_2$  kmol/s

Ar secundário 85% : 0,208153  $O_2$  + 0,783052  $N_2$  kmol/s

#### 4.7.3.3 - Fluxo de gases e sólidos

Como no processo de fabricação de clínquer ocorrem reações químicas, as relações das massas que entram e saem dos volumes de controles foram transformadas em kmol/s.

As composições molares dos gases à saída do forno rotativo, do 4º, 3º estágio e 1º estágio, bem como a quantidade de ar primário e de ar secundário para a combustão, são apresentadas na Tabela 5.18. O volume de ar necessário à combustão foi calculado levando-se em conta uma porcentagem de 3,0% de  $O_2$  livre presente nos gases, na base seca. O  $CO_2$  oriundo da calcinação do carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) e da descarbonatação do carbonato de magnésio ( $MgCO_3$ ), é somado à composição dos gases de combustão, assim como o vapor de água oriundo da umidade do cru (1,7%). O ar primário é introduzido no queimador a 59 °C e corresponde a 15% do total do ar necessário a combustão. O ar secundário é introduzido no forno pré-aquecido a 700 °C, devido à troca de calor no resfriador de clínquer, e corresponde a 85% do total do ar necessário a combustão.

Tabela 4.17 - Composição elementar dos gases, ar primário e ar secundário em kmol/s.

Gás	Saída do Primeiro Estágio	Saída do Terceiro Estágio	Saída do Quarto Estágio	Saída do Forno	AR Primário	AR Secundário
CO <sub>2</sub>	0,417575	0,417575	0,414121	0,355225	---	---
H <sub>2</sub> O	0,075533	0,056652	0,056652	0,056652	---	---
SO <sub>2</sub>	0,001160	0,001160	0,001160	0,001160	----	----
O <sub>2</sub>	0,039512	0,039512	0,039512	0,039512	0,036733	0,208153
N <sub>2</sub>	0,922284	0,922284	0,922284	0,922284	0,138186	0,783052

A Tabela 4.18 apresenta a quantidade de cada elemento em kmol/s e em % de massa, introduzido no processo através das cinzas dos combustíveis e do cru, para uma produção de 19,75 kg/s de clínquer.

Tabela 4.18 - Composição dos elementos das cinzas dos combustíveis e do cru.

Componentes	Carvão vegetal kmol/s	Coque petróleo kmol/s	Raspa pneus kmol/s	Farinha kmol/s	Total kmol/s	Total kg/s	% em massa
CaO	0,004046	---	0,000074	0,231466	0,235586	13,192793	66,76
SiO <sub>2</sub>	0,002440	0,000053	0,000142	0,066513	0,069149	4,148952	20,99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,000098	0,000020	0,000035	0,009818	0,009970	1,016961	5,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	---	0,000004	0,005027	0,005030	0,804834	4,07
MgO	0,000823	0,000002	0,000013	0,002616	0,003454	0,138150	0,70
SO <sub>3</sub>	---	---	0,000075	0,002694	0,002769	0,221485	1,12
Na <sub>2</sub> O	---	---	0,000007	0,000194	0,000201	0,012478	0,06
K <sub>2</sub> O	---	---	0,000004	0,002253	0,002257	0,212127	1,07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	---	---	0,000003	0,000003	0,000003	0,000400	0,002
ZnO	---	---	0,000165	0,000165	0,000165	0,013396	0,068
Total	0,007407	0,000075	0,000520	0,320749	0,328583	19,761576	100,00

O fluxo da farinha para entrada do 1º ao 4º estágio e entrada do forno, considerando a incorporação de cinzas proveniente da queima do combustível, bem como o número de moles são apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Composição química elementar da farinha e do clínquer, em kmol/s.  
para produção de 19,75 kg/s de clínquer em Forno com Pré-aquecedor de 4 estágios.

Composição Química do cru e clínquer	Massa da farinha	PM kg/kmol	Entrada 1º estágio 60 °C	Entrada 2º estágio 700 °C	Entrada 3º estágio 800°C	Saída do forno 1365°C	Massa do clínquer kg/s
CaCO <sub>3</sub>	23,1466	100	0,231466	0,231466	0,173599	---	---
SiO <sub>2</sub>	3,99078	60	0,066513	0,066513	0,066513	---	---
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,001436	102	0,009818	0,009818	0,009818	---	---
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,80432	160	0,005027	0,005027	0,005027	---	---
MgCO <sub>3</sub>	0,219744	84	0,002616	0,000000	0,000000	---	---
SO <sub>3</sub>	0,21552	80	0,002694	0,002694	0,002694	---	---
Na <sub>2</sub> O	0,012028	62	0,000194	0,000194	0,000194	---	---
K <sub>2</sub> O	0,211782	94	0,002253	0,002253	0,002253	---	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	---	142	---	---	0,000000	---	---
CaO	---	56	---	---	0,057866	---	---
MgO	---	40	---	0,002616	0,002616	0,003454	0,138160
C2S	---	172	---	---	---	0,008993	1,546796
C3S	---	228	---	---	---	0,060155	13,715340
C3A	---	270	---	---	---	0,004940	1,333800
C4AF	---	486	---	---	---	0,005027	2,443122
Cl	---	72	---	---	---	---	---
CO <sub>2</sub>	---	44	---	---	---	---	---
CaSO <sub>4</sub>	---	136	---	---	---	0,000322	0,043792
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	---	142	---	---	---	0,000201	0,028542
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	---	174	---	---	---	0,002257	0,392718
Cal livre	---	56	---	---	---	0,001869	0,104664
Total	29,60221	---	0,320581	0,320581	0,320581	0,087218	19,746934

#### 4.7.3.4 - Cálculo da exergia dos fluxos

Para efeito do cálculo da exergia dos fluxos de sólidos e gases. O sistema foi subdividido em seis volumes de controle, conforme especificado no Item 4.7.2.4, Figuras 4.1 e 4.2. O resultado dos cálculos das exergias são apresentados na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Resultado dos cálculos de exergia para a instalação do forno rotativo com pré-aquecedor de quatro estágios, para uma produção de 19,75 kg/s de clínquer.

SÓLIDOS			GASES		
Fluxo	Temperatura K	Exergia kW	fluxo	Temperatura K	Exergia kW
1	333,15	4214,40	8	973,15	12670,95
2	603,15	7015,911	9	---	74224,46
3	785,15	10473,50	10	332,15	134,00
4	973,15	14823,90	11	1383,15	37556,91
5	1073,15	22177,70	12	1103,15	28269,48
6	1638,15	37671,70	13	940,15	21971,28
7	393,15	20576,10	14	810,15	17355,52
---	---	---	15	644,15	12134,92

#### 4.7.3.5 - Eficiência térmica do sistema

Utilizando os valores calculados para entalpia e exergia e as Equações apresentadas nos Itens 4.2 e 4.5 para o cálculo das eficiências da 1ª Lei e da Eficiência Racional, substituindo-se os valores correspondentes a cada volume de controle, foram calculadas as eficiências do sistema cujos resultados são mostrados na Tabela 4.22.

#### Calculo da eficiência térmica global dos sistemas através do uso da 1ª Lei.

O consumo específico de calor (Cec), levando em conta as perdas de calor originadas no processo, foi de 3785,24 kJ/kg de clínquer. Utilizando a equação (5.2), calcula-se  $\Delta H_{th}^o$ :

$$\Delta H_{th}^o = 17,21 \times 5,15 + 27,13 \times 0,7 + 32,01 \times 66,76 - 21,42 \times 20,99 - 2,4 \times 4,07 = 1785,24 \text{ kJ/kg cliq}$$

Entrando com os valores na equação (4.1), vem:

$$\eta_{1L} = \frac{\Delta H_{th}^o}{Cec} = \frac{1785,24}{3758,2} = 0,475 = 47,50\%$$

#### Eficiência Racional

Os resultados dos cálculos das eficiências baseados na Primeira Lei e na Segunda Lei (Eficiência Racional) são apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Resultados dos cálculos das eficiências térmicas baseadas na 1ª Lei e na 2ª Lei.

Volume de Controle	Eficiência pela 1ª Lei $\eta_{1L}$	Eficiência pela 2ª Lei (Eficiência Racional $\psi$ )
1º Estágio	89,78%	53,66%
2º Estágio	91,96%	74,91%
3º Estágio	74,31%	69,07%
Pré-aquecedor (do 1º ao 3º Estágio)	84,44%	65,76%
4º Estágio	89,44%	79,16%
Forno Rotativo	60,10%	31,32%
Forno Rotativo + 4º Estágio	66,14%	38,84%
Resfriador de Clínquer	81,35%	73,24%
Eficiência Global	47,50%	21,84%

## 4.8 - ANÁLISE DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE CLÍNQUER COM FORNO ROTATIVO COM PRÉ-AQUECEDOR DE QUATRO ESTÁGIOS E PRÉ-CALCINADOR

A terceira instalação analisada possui um forno rotativo com pré-aquecedor de quatro estágios e pré-calcinador. A capacidade máxima de produção é de 3000 t/dia de clínquer e consumo específico de 3150 kJ/kg de clínquer. A instalação está equipada com queimador e dispositivos para o co-processamento de pneus. A taxa de alimentação de combustível em energia requerida no forno é apresentada na Tabela 4.5. Para análise desta instalação foi utilizada a mistura de combustíveis, denominada MIX-C, cuja composição química elementar individual dos combustíveis é apresentada na Tabela 4.6. A tabela 4.7 apresenta a composição química das cinzas dos combustíveis.

### 4.8.1 - Principais Características Técnicas da Instalação

- Diâmetro na zona de clínquerização 3,80 m,
- Comprimento da parte rotativa do forno 80,00 m;
- Inclinação do forno 4,0%;
- Rotação variável de 0,8 a 4,0 rpm;

- Pré-aquecedor de ciclone de 4 estágios;
- Pré-calcinador com 7,0 m de diâmetro, com 3 queimadores;
- O resfriador do clínquer tipo grelhas horizontais de três estádios.

#### 4.8.2 - Principais Características Técnicas do Processo de Produção

- Produção de clínquer: 3000 t/dia correspondente a 34,72 kg/s;
- Alimentação de farinha no 1º estágio: 54,385 kg/s;
- Grau de calcinação no pré-calcinador: 70%;
- Calor de formação: 1777,189 kJ/kg clínquer;
- Poder calorífico inferior dos combustíveis MIX-C: Tabela 4.6;
- Consumo específico de calor no sistema: 3150 kJ/kg clínquer;
- Consumo de combustível no forno: 1,664611 kg/s (Tabela 4.22);
- Consumo de combustível no pré-calcinador: 2,496913 kg/s (Tabela 4.24);
- Módulo de Alumina da farinha, MA = 1,846;
- Módulo Sílica da farinha, MS = 2,413;
- Fator de Saturação de cal da farinha, FSC = 128,18;
- Cal livre: 0,99%.

#### 4.8.3- Combustão

Este processo de produção de clínquer utiliza cerca de 60% do combustível necessário no pré-calcinador. As características do combustível denominado MIX-C, utilizados tanto nos queimadores do pré-calcinador quanto no queimador do forno rotativo, são apresentadas na Tabela 5.6 e Tabela 5.7

##### 4.8.3.1 - Combustão no queimador do forno

Energia requerida para produção de 1kg de clínquer no forno com pré-calcinador e Pré-aquecedor de quatro estágio é de 3150,0 kJ/kg;  
Energia requerida no forno (40%):  $0,4 \times 3150 = 1260$  kJ/kg;

Composição do MIX-C: 50,41% de carvão vegetal, 36,25% de coque de petróleo importado e 13,34% de pneu.

Energia requerida para o carvão:  $0,5041 \times 1260 = 635,166$  kJ/kg

Energia requerida para o coque:  $0,3625 \times 1260 = 456,75$  kJ/kg

Energia requerida para o pneu:  $0,1334 \times 1260 = 168,084$  kJ/kg

### Consumo de combustível:

Consumo de carvão, PCI = 21648 kJ/kg

Consumo específico do  $C_{\text{carvão}}$ :

$$C_{\text{carvão}} = \frac{635,166}{21648} = 0,029341 \text{ kg}_{\text{carvão}}/\text{kg}_{\text{clínq.}}$$

Consumo de coque, PCI = 33974 kJ/kg

Consumo específico do  $C_{\text{coque}}$ :

$$C_{\text{coque}} = \frac{456,75}{33974} = 0,013444 \frac{\text{kg}_{\text{coque}}}{\text{kg}_{\text{clínq.}}}$$

Consumo de pneu, PCI = 32580 kJ/kg

Consumo específico de pneu  $C_{\text{pneu}}$ :

$$C_{\text{pneu}} = \frac{168,084}{32580} = 0,005159 \text{ kg}_{\text{comb.}}/\text{kg}_{\text{clínq.}}$$

### O consumo de combustível no forno rotativo

O consumo de carvão:  $34,72 \times 0,029341 = 1,018707$  kg/s

O consumo de coque:  $34,72 \times 0,013444 = 0,466779$  kg/s

O consumo de pneu:  $34,72 \times 0,005159 = 0,179125$  kg/s

Os resultados dos cálculos estão apresentados na Tabela 4.22

A partir dos dados dos combustíveis apresentados nas Tabelas 4.6, 4.7 e do consumo de combustível apresentado na Tabela 4.22, foi calculada a quantidade de cada substância em

kmol/s para produção de 34,72 kg de clínquer por segundo, os resultados dos cálculos estão apresentados na Tabela 4.23.

Tabela 4.22 - Consumo de combustíveis no forno rotativo em kg/s para produção de 34,72 kg/s de clínquer.

Combustíveis	MIX-C Composição %	PCI kJ/kg	CeC kJ/kg	Consumo Combustível Kg/s
Carvão vegetal	50,41	21648,00	635,166	1,018707
Coque importado	36,25	33974,00	456,750	0,466779
Rasas de pneus	13,34	32580,00	168,084	0,179125
Total	100,00	---	1260,000	1,664611

Tabela 4.23 - Quantidade dos elementos no forno rotativo em kmol/s para produção de 34,72 kg/s de clínquer.

COMBUSTÍVEL	SUBSTÂNCIAS					
	C	H2	S	O2	N2	H2O
Carvão Vegetal.	0,059969	0,016350	0,000092	0	0,000371	0,001007
Coque Importado	0,034219	0,007725	0,000684	0,000131	0,000253	0,000078
Rasas de pneus	0,010770	0,006036	0,000069	0,000558	0,000023	0,000101
<b>Total</b>	<b>0,104957</b>	<b>0,030112</b>	<b>0,000845</b>	<b>0,000689</b>	<b>0,000647</b>	<b>0,001187</b>

### Balanceamento Estequiométrico

O<sub>2</sub> necessário para combustão:

+0,104957 → O<sub>2</sub> de CO<sub>2</sub>

+ 0,030112/2 → O<sub>2</sub> de H<sub>2</sub>O

+0,000845 → O<sub>2</sub> de SO<sub>2</sub>

-0,000689 → O<sub>2</sub> do combustível

0,122051 kmol/s

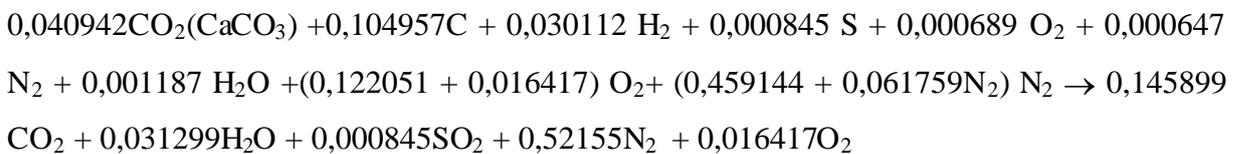
0,040942CO<sub>2</sub>(CaCO<sub>3</sub>) + 0,104957C + 0,030112 H<sub>2</sub> + 0,000845 S + 0,000689 O<sub>2</sub> + 0,000647 N<sub>2</sub> + 0,001187 H<sub>2</sub>O +(0,122051O<sub>2</sub> + O<sub>2liv</sub>) + (0,459144 N<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> do O<sub>2liv</sub>) → 0,104957 CO<sub>2</sub> + 0,030112H<sub>2</sub>O +0,001187H<sub>2</sub>O + 0,000845 SO<sub>2</sub> + 0,040942CO<sub>2</sub>(CaCO<sub>3</sub>) + 0,00064N<sub>2</sub> +(0,459144 N<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> do O<sub>2liv</sub>)) + O<sub>2liv</sub>

**Cálculo do O<sub>2</sub> livre** - Considerando um excesso de ar correspondente a 2,4% de O<sub>2</sub> livre e substituindo os valores na Equação (4.22), tem-se:

$$0,024 = \frac{O_{2 \text{ livre}}}{0,040952 + 0,104957 + 0,000845 + 0,459144 + 4,76 \cdot O_{2 \text{ livre}}}$$

Resolvendo a Equação vem: 0,016417 kmol/s de O<sub>2</sub> livre → 0,061759 kmol/s de N<sub>2</sub>

A Equação de combustão corrigida com 2,4% de O<sub>2</sub> livre, somada com a calcinação do CaCO<sub>3</sub> no forno:



Ar: 0,138468 O<sub>2</sub> + 0,520903 N<sub>2</sub> kmol/s

Ar primário 15% : 0,020770 O<sub>2</sub> + 0,078136 N<sub>2</sub> kmol/s

Ar secundário 85% : 0,117698 O<sub>2</sub> + 0,442768 N<sub>2</sub> kmol/s

#### 4.8.3.2 - Combustão nos queimadores do pré-calcinador

Energia requerida no pré-calcinador (60%): 0,6 x 3150 = 1890 kJ/kg.

Composição do MIX-A: 50,41% de carvão vegetal, 36,25% de coque de petróleo importado e 13,34% de pneu.

Energia requerida para o carvão: 0,5041 x 1890 = 952,749 kJ/kg

Energia requerida para o coque: 0,3625 x 1890 = 685,125 kJ/kg

Energia requerida para o pneu: 0,1334 x 1890 = 252,126 kJ/kg

#### Consumo de combustível:

Consumo de carvão, PCI = 21648 kJ/kg

Consumo específico do C<sub>carvão</sub>:

$$C_{\text{carvão}} = \frac{952,749}{21648} = 0,044011 \text{ kg}_{\text{carvão}}/\text{kg}_{\text{clínq.}}$$

Consumo de coque, PCI = 33974 kJ/kg

Consumo específico do  $C_{\text{coque}}$ :

$$C_{\text{coque}} = \frac{685,125}{33974} = 0,020166 \text{ kg}_{\text{coque}}/\text{kg}_{\text{clínq.}}$$

Consumo de pneu, PCI = 32580 kJ/kg

Consumo específico de pneu  $C_{\text{pneu}}$ :

$$C_{\text{pneu}} = \frac{252,126}{32580} = 0,007739 \text{ kg}_{\text{comb.}}/\text{kg}_{\text{clínq.}}$$

### O consumo de combustível no pré-calcinador

O consumo de carvão:  $34,72 \times 0,044011 = 1,528062 \text{ kg/s}$

O consumo de coque:  $34,72 \times 0,020166 = 0,700164 \text{ kg/s}$

O consumo de pneu:  $34,72 \times 0,007739 = 0,268687 \text{ kg/s}$

Os resultados dos cálculos estão apresentados na Tabela 4.24

A partir dos dados dos combustíveis apresentados na Tabela 4.6, na Tabela 4.7 e do consumo de combustível apresentado na Tabela 4.24, foi calculada a quantidade de cada substância em kmol/s. Os resultados dos cálculos estão apresentados na Tabela 4.25.

Tabela 4.24 - Consumo de combustíveis no pré-calcinador em kg/s para produção de 34,72 kg/s de clínquer

Combustíveis	MIX-C Composição %	PCI kJ/kg	CeC kJ/kg	Consumo Combustível Kg/s
Carvão vegetal	50,41	21648,00	952,749	1,528062
Coque importado	36,25	33974,00	685,125	0,700164
Raspas de pneus	13,34	32580,00	252,126	0,268687
Total	100	---	1890,000	2,496913

Tabela 4.25 Quantidade de substância no pré-calcinador em kmol/s para produção de 34,72 kg/s de clínquer

COMBUSTÍVEL	SUBSTÂNCIAS					
	C	H2	S	O2	N2	H2O
Carvão Vegetal.	0,089952	0,024525	0,000138	0	0,000557	0,001511
Coque Importado	0,051328	0,011588	0,001026	0,000197	0,000380	0,000117
Raspa de pneus	0,016155	0,009055	0,000103	0,000837	0,000035	0,000152
<b>Total</b>	<b>0,157435</b>	<b>0,045168</b>	<b>0,001267</b>	<b>0,001034</b>	<b>0,000972</b>	<b>0,001780</b>

### Balanceamento Estequiométrico

O<sub>2</sub> Necessário para combustão:

+0,157435 → O<sub>2</sub> de CO<sub>2</sub>

+ 0,045168/2 → O<sub>2</sub> de H<sub>2</sub>O

+0,001267 → O<sub>2</sub> de SO<sub>2</sub>

.0,016417 → O<sub>2liv</sub> do forno

-0,001034 → O<sub>2</sub> do combustível

0,163835 kmol/s

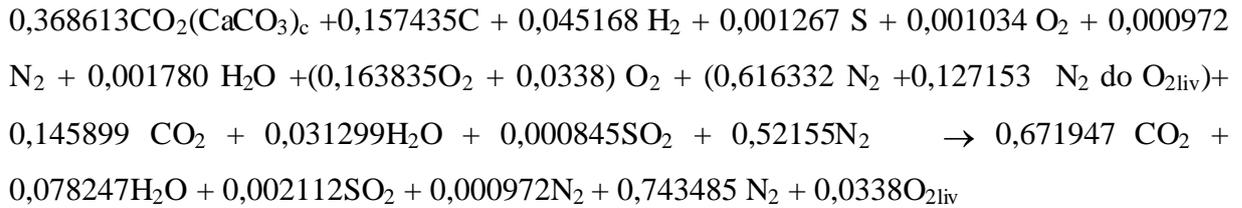
$$0,368613\text{CO}_2(\text{CaCO}_3)_c + 0,157435\text{C} + 0,045168\text{H}_2 + 0,001267\text{S} + 0,001034\text{O}_2 + 0,000972\text{N}_2 + 0,001780\text{H}_2\text{O} + (0,163835\text{O}_2 + \text{O}_{2\text{liv}}) + (0,616332\text{N}_2 + \text{N}_2 \text{ do } \text{O}_{2\text{liv}}) + 0,145899\text{CO}_2 + 0,031299\text{H}_2\text{O} + 0,000845\text{SO}_2 + 0,52155\text{N}_2 \rightarrow 0,671947\text{CO}_2 + 0,078247\text{H}_2\text{O} + 0,002112\text{SO}_2 + 0,000972\text{N}_2 + (0,685870\text{N}_2 + \text{N}_2 \text{ do } \text{O}_{2\text{liv}}) + \text{O}_{2\text{liv}}$$

**Cálculo do O<sub>2</sub> livre** - Considerando um excesso de ar correspondente a 1,7% de O<sub>2</sub> livre e substituindo os valores na Equação (4.22), tem-se:

$$0,017 = \frac{\text{O}_{2 \text{ livre}}}{0,671947 + 0,002112 + 0,016417 + 1,136882 + 4,76 \cdot \text{O}_{2\text{livre}}}$$

Resolvendo a Equação vem: 0,0338 kmol/s de O<sub>2</sub> livre → 0,127153 kmol/s de N<sub>2</sub>

A Equação de combustão corrigida com 1,7% de O<sub>2</sub> livre, somada com a calcinação do CaCO<sub>3</sub> no forno:



Ar:  $0,197635\text{O}_2 + 0,743484\text{N}_2$  kmol/s

Ar primário 15% :  $0,029645\text{O}_2 + 0,111523\text{N}_2$  kmol/s

Ar terciário 85% :  $0,16799\text{O}_2 + 0,631961\text{N}_2$  kmol/s

#### 4.8.4 - Fluxo de Gases e Sólidos

As composições molares dos gases na saída do forno rotativo, no 4º estágio e no 1º estágio, bem como a quantidade de ar primário, ar secundário e de ar terciário, para a combustão, são apresentadas na Tabela 4.26. O volume de ar necessário à combustão foi calculado levando-se em conta uma porcentagem de 2,4% de  $\text{O}_2$  livre no queimador do forno e de 1,7% de  $\text{O}_2$  livre nos queimadores do pré-calcinador, presente nos gases, na base seca. O  $\text{CO}_2$  oriundo da calcinação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e da descarbonatação do carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ), é somado à composição dos gases de combustão, assim como o vapor de água oriundo da umidade do cru (1,7%). O ar primário é introduzido no queimador do forno a 59 °C e corresponde a 15% do total do ar necessário a combustão. O ar secundário é introduzido no forno pré-aquecido a 1115 °C e corresponde a 85%, o ar terciário é introduzido no pré-calcinador a 764°C e corresponde a 85% do total do ar necessário a combustão no pré-calcinador. O ar é pré-aquecido no trocador de calor do resfriador de clínquer.

Tabela 4.26 - Composição elementar dos gases, ar primário e ar secundário, em kmol/s.

Gás	Saída do Primeiro Estágio	Saída do Quarto Estágio	Saída do Forno	AR Primário calcinador	AR Terciário calcinador	AR Primário forno	AR Secundário forno
CO <sub>2</sub>	0,695090	0,671947	0,145899	---	---	---	---
H <sub>2</sub> O	0,078247	0,078247	0,031299	---	---	---	---
SO <sub>2</sub>	0,002112	0,002112	0,000845	---	---	---	---
O <sub>2</sub>	0,0338	0,0338	0,016417	0,029645	0,16799	0,020770	0,117698
N <sub>2</sub>	1,266006	1,266006	0,52155	0,111523	0,631961	0,078136	0,442768

O fluxo da farinha para entrada do 1º ao 4º estágio e entrada do forno, considerando a incorporação de cinzas proveniente da queima do combustível, bem como o número de moles são apresentados na tabela 4.27

Tabela 4.27 - Composição química elementar da farinha e do clínquer, em kmol/s. Para produção de 34,72 kg/s de clínquer em forno com pré-aquecedor de 4 estágios e pré-calcinador.

Composto da farinha e clínquer	Peso da farinha kg/s	PM kg/kmol	Entrada 1º estágio 60 °C	Entrada 4º estágio e pré-calcinador 660 °C	Entrada no forno 800°C	Saída do forno 1365°C	Peso do clínquer Kg/s
CaCO <sub>3</sub>	40,954969	100	0,409550	0,409550	0,040955	---	---
SiO <sub>2</sub>	6,964686	60	0,116078	0,116078	0,116078	---	---
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,873223	102	0,018365	0,018365	0,018365	---	---
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,012847	160	0,006330	0,006330	0,006330	---	---
MgCO <sub>3</sub>	1,944013	84	0,023143	0,000000	0,000000	---	---
SO <sub>3</sub>	0,500978	80	0,006262	0,006262	0,006262	---	---
Na <sub>2</sub> O	0,016336	62	0,000263	0,000263	0,000263	---	---
K <sub>2</sub> O	0,435633	94	0,004634	0,004634	0,004634	---	---
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,070790	142	0,000498	0,000498	0,000498	---	---
CaO	---	56	---	---	0,368595	---	---
MgO	---	40	---	0,023143	0,023143	0,023143	0,925720
C2S	---	172	---	---	---	0,009536	1,640192
C3S	---	228	---	---	---	0,106547	24,292716
C3A	---	270	---	---	---	0,012035	3,249351
C4AF	---	486	---	---	---	0,006330	3,076523
Cl	0,007624	72	0,000106	0,000106	0,000106	---	---
CO <sub>2</sub>	---	44	---	---	---	---	---
CaSO <sub>4</sub>	---	136	---	---	0,003132	0,003132	0,425952
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	---	142	---	---	---	0,000264	0,037488
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	---	174	---	---	---	0,004634	0,806316
Cal livre	---	56	---	---	---	0,006200	0,347200
CaCl <sub>2</sub>	---	112	---	---	---	0,001060	0,118720
Total	53,781100	---	0,585231	0,585231	0,588363	0,172881	34,920178

#### 4.8.4.1 - Cálculo da exergia dos fluxos

Para efeito do cálculo da exergia dos fluxos de sólidos e gases. O sistema foi subdividido em seis volumes de controle, sendo: quatro volumes de controle para o pré-aquecedor, um volume de controle para o forno rotativo e um volume de controle para o resfriador de clínquer. Para o cálculo da eficiência foi considerados mais dois volumes de controle. O primeiro engloba os três primeiros estágios do pré-aquecedor e o segundo engloba o forno rotativo e o quarto estágio do pré-aquecedor, onde ocorrem as principais reações do processo. A Figura 4.3 mostra

um esquema dos volumes de controle com os fluxos dos sólidos e gases, a Figura 4.4 os dados relativos às temperaturas de operação em alguns pontos da instalação e a Tabela 4.28 os resultados dos cálculos das exergias.

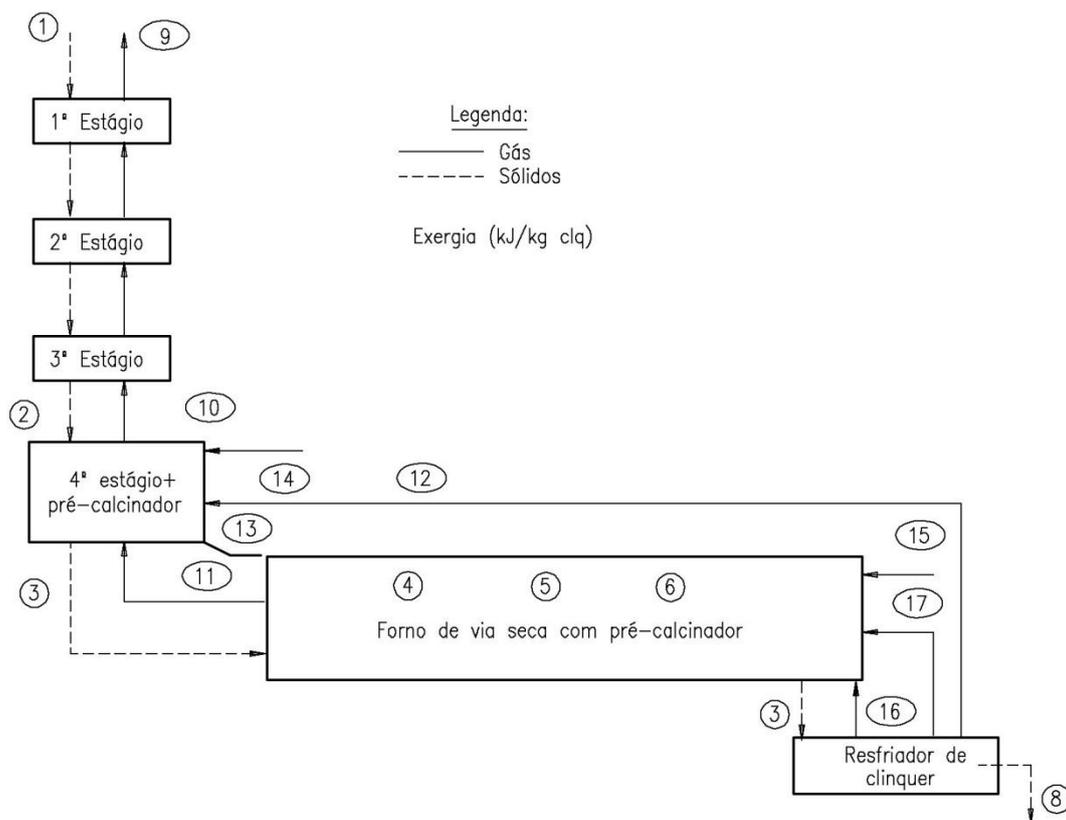


Figura 4.3- Esquema dos volumes de controle com os fluxos dos sólidos e gases para a instalação com forno rotativo equipado com pré-calcinador e pré-aquecedor de 4 estágios.

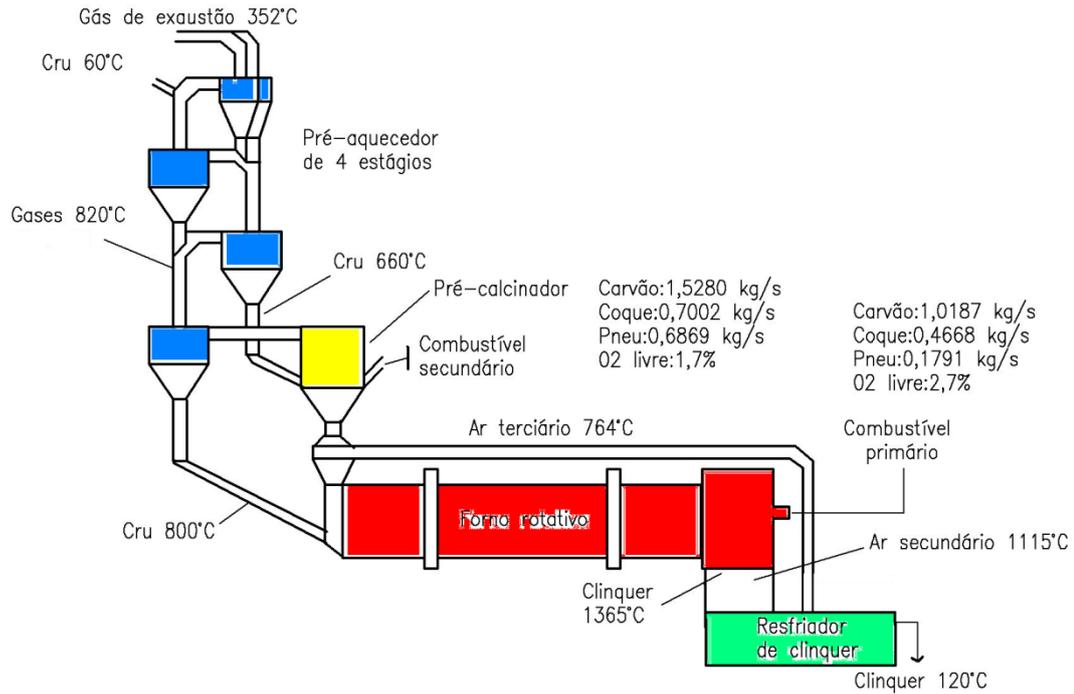


Figura 4.4 - Esquema da instalação de via seca com forno rotativo com pré-aquecedor de 4 estágios e pré-calcinador

Tabela 4.28 – Resultado dos cálculos de exergia para a instalação do forno rotativo com pré-aquecedor de quatro estágios e pré-calcinador, para uma produção de 34,72 kg/s de clínquer.

SÓLIDOS			GASES		
Fluxo	Temperatura K	Exergia kW	fluxo	Temperatura K	Exergia kW
1	333,15	8931,27	9	623,15	18235,27
2	933,15	26689,50	10	1093,15	42900,75
3	1073,15	56957,80	11	1273,15	16180,04
4	1368,15	57669,86	12	1037,15	11181,41
5	1478,15	60458,82	13	332,15	108,08
6	1728,15	70322,84	14	Combustível calc.	65620,68
7	1638,15	67368,6	15	Combustível forno	43728,25
8	393,15	37288,50	16	1388,15	11520,64
---	---	---	17	332,15	75,72

#### 4.8.4.2 - Eficiência térmica do sistema

Utilizando os valores calculados para entalpia e exergia e as Equações apresentadas nos Itens 5.2 e 5.5 para o cálculo das eficiências da 1ª Lei e da Eficiência Racional, substituindo-se os valores correspondentes a cada volume de controle, foram calculadas as eficiências do sistema cujos resultados são mostrados na Tabela 5.30.

#### Calculo da eficiência térmica global dos sistemas através do uso da 1ª Lei.

O consumo específico de calor ( $C_{ec}$ ), levando em conta as perdas de calor originadas no processo, foi de 3150,0 kJ/kg de clínquer. Utilizando a Equação (5.2), calcula-se  $\Delta H_{th}^o$ :

$$\Delta H_{th}^o = 17,21 \times 5,39 + 27,13 \times 2,67 + 32,01 \times 66,06 - 21,42 \times 20,06 - 2,4 \times 2,92 = 1843,09 \text{ kJ/kg cliq}$$

substituindo os valores na Equação (5.1), vem:

$$\eta_{1L} = \frac{\Delta H_{th}^o}{C_{ec}} = \frac{1843,09}{3150} = 0,5851 = 58,51\%$$

#### Eficiência Racional

Os resultados dos cálculos das eficiências baseados na Primeira Lei e na Segunda Lei (Eficiência Racional) são apresentados na Tabela 4.29.

Tabela 4.29 - Resultados dos cálculos das eficiências térmica baseada na 1ª Lei e na 2ª Lei

Volume de Controle	Eficiência pela 1ª Lei $\eta_{1L}$	Eficiência pela 2ª Lei (Eficiência Racional $\psi$ )
Pré-aquecedor (1º ao 3º Estágio)	91,95%	71,99%
Pré-calcinador + 4º Estágio	89,71	60,44%
Forno Rotativo	51,38	25,41%
Pré-calcinador + 4º Estágio + Forno	79,73	44,67%
Resfriador de Clínquer	84,09%	75,10%
Eficiência Global	58,51%	24,50%

## 4.9 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando o forno com sistema de pré-calcinação, no qual cerca de 60% do calor necessário ao processo, oriundo da queima de combustível, são fornecidos no pré-calcinador, verifica-se que o mesmo apresenta a maior eficiência térmica entre os três processos analisados. Convém lembrar que a queima do combustível no pré-calcinador ocorre em temperaturas mais baixas que no forno (entre 900 e 1200°C), e que existe uma intensa troca de calor com os sólidos em suspensão, o que contribui para uma diminuição da geração de irreversibilidade na etapa de calcinação (Silva,1994),

Ocorrendo a maior parte da reação de calcinação no pré-calcinador, externamente ao forno, este também por ser mais curto, apresentam com isto um aumento substancial em sua Eficiência Racional ( $\psi$ ), em relação aos fornos rotativos somente com pré-aquecedor. Verifica-se pela Tabela 4.30, que o subsistema constituído pelo forno continua sendo a parte do processo, onde ocorrem as maiores irreversibilidades, seguido do subsistema constituído pelo pré-calcinador e o quarto estágio.

A partir de uma análise dos processos com forno rotativo dotado de pré-aquecedor operando com as mistura de combustível MIX-A e MIX-B e também do forno com pré-calcinador e pré-aquecedor, operando com a mistura de combustível MIX-C utilizados nos processos analisados nos Itens 5.7, 5.8 e 5.9, chegou-se aos seguintes resultados apresentados na Tabela 4.30.

Tabela 4.30 - Eficiência Racional para o processo de Forno com Pré-aquecedor e Forno com pré-calcinador e pré-aquecedor, operando com os combustíveis MIX-A, MIX-B e MIX-C

Volume de Controle	Forno rotativo com pré-aquecedor de 4 estágios		Forno c/ pré-calcinador e pré-aquecedor de 4 estágios
	MIX-A	MIX-B	MIX-C
Pré-aquecedor (3 estágios)	67,52%	65,76%	71,99%
4º Estágio + Forno	40,34%	38,84%	-
4º Est. + Pré-calc. + Forno	-	-	44,67%
Resfriador de Clínquer	76,34%	73,24%	75,10%
Eficiência Global	22,65%	21,84%	24,50%

Pode-se concluir dos resultados apresentados na Tabela 4.30, que a variação dos tipos da mistura dos combustíveis utilizados e os resíduos co-processados levam a uma variação da eficiência dos sistemas analisados.

Pelo uso do MIX-A no forno com pré-aquecedor de 4 estágios, este apresentou uma maior eficiência, de 2,7% nos pré-aquecedores, 3,7% no sistema formado pelo 4º Estágio + Forno, e de 4,2% no resfriador de clínquer, em relação ao uso do combustível MIX-B. A diferença foi de 3,7% na Eficiência Global do sistema. Entretanto, como foi considerada a mesma vazão de alimentação nos dois sistemas, sabe-se que pode haver uma queda da produção de clínquer, devido às alterações que ocorrem no processo de transferência de calor e escoamento dos gases no interior do forno, ocasionadas pela variação dos gases gerados na combustão e calcinação dos sólidos.

O forno com pré-calcinador e pré-aquecedor de 4 estágios apresenta um razoável aumento de eficiência utilizando o MIX-C. Se comparado ao forno com pré-aquecedor de 4 estágios utilizando MIX-B, o forno com pré-calcinador utilizando o MIX-C, apresentou aumento da eficiência de: 9,2% nos pré-aquecedores, 15% no sistema formado pelo 4º Estágio + Pré-calcinador + Forno, e de 2,5% no resfriador de clínquer, e um ganho na Eficiência Global do sistema de 12%.

Isto vem mostrar que a escolha adequada dos combustíveis e resíduos a serem co-processados, e do tipo de instalação de queima, pode trazer ganhos energéticos se bem analisados.

## **Capítulo 5**

# **ANÁLISE TERMoeCONômICA DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE CIMENTO**

## **5.1- INTRODUÇÃO**

Este capítulo analisa os processos de fabricação de Cimento Portland, com base na teoria termoeconômica desenvolvida por Valero et al. (2000). A análise termoeconômica foi feita a partir dos dados obtidos dos fluxos de exergia da análise exergética do Capítulo 4. Com o uso da teoria termoeconômica é possível obter a quantidade necessária de exergia em cada etapa da produção, bem como a exergia necessária para produção de uma determinada quantidade de clínquer ou de cimento. Com os dados disponíveis dos custos monetários envolvidos no processo (retorno de capital, custo com o pessoal, matéria-prima, energia, etc.), é possível obter os custos unitários de produção.

## **5.2 - TEORIA TERMoeCONômICA**

Um processo industrial produtivo pode ser considerado como um sistema formado de várias unidades de equipamentos e máquinas, relacionados entre si, através de fluxos de materiais, energias ou informações trocadas. A produção de Cimento Portland em uma fábrica de ciclo completo pode ser considerada como um sistema, a qual se dá através de uma série de etapas, quais são: extração das matérias-primas nas minas, preparação e dosagem das

matérias-primas, moagem do cru, homogeneização, fabricação do clínquer em fornos rotativos, moagem final do cimento composto de clínquer e substâncias ativas. Todas estas etapas desempenham funções próprias, permitindo uma análise particular de cada função dentro do processo global de produção.

Uma vez especificado o estado do ambiente, pode-se considerar a exergia como sendo uma função de estado e reflete a quantidade mínima dependida para se obter um produto a partir do ambiente de referência. Assim, pode-se dizer que a exergia é independente do processo utilizado para a fabricação de um produto e representa um ‘custo mínimo’ (em termos energéticos) necessário para produzi-lo. Como todos os processos reais são irreversíveis, verificando-se destruição ou perdas de exergia, ter-se-á sempre que a exergia necessária para obter um produto funcional, denominado aqui de ‘Custo Exergético’ ( $B^*$ ), será função do processo utilizado, incorporando as perdas exergéticas do processo, e qualquer que seja este, o custo exergético será sempre maior que a exergia (Lozano and Valero, 1987). Assim:

### **Custo Exergético > Exergia**

Desse modo, a otimização energética do processo deve caminhar no sentido de maximizar o valor da Eficiência Exergética “ $\eta$ ”, e de minimizar o valor do Custo Exergético Unitário “ $k$ ”, cujas definições são representadas pelas Equações (5.1) e (5.2):

$$\eta_B = \frac{\text{Exergia}}{\text{Custo Exergético}} \quad (5.1)$$

$$k = \frac{\text{Custo Exergético}}{\text{Exergia}} \quad (5.2)$$

Para o cálculo dos Custos Exergéticos ( $B^*$ ) em um sistema é necessário, inicialmente, definir os fluxos de calor, trabalho ou matéria, nos volumes de controles, representados por fluxos de materiais sólidos, gases ou energia, definindo aqueles que atuam como fontes de exergia (ou combustíveis), denominados de “Recursos” (F), necessários a fabricação de um determinado “Produto” (P), pelo sistema. Assim, a exergia contida em um produto obtido num sistema analisado, é definida pela Equação (5.3):

$$\text{PRODUTO (P)} = \text{RECURSOS (F)} - \text{PERDAS (L)} - \text{DESTRUIÇÃO (D)} \quad (5.3)$$

e a Eficiência Exergética Global ( $\eta_B$ ) é definida pela Equação (5,4):

$$\eta_B = \frac{\text{PRODUTO (P)}}{\text{RECURSOS (F)}} \quad (5.4)$$

Substituindo o conceito de produto definido na Equação (5.3) na Equação (5.4), resulta a Equação (5.5):

$$\eta_B = 1 - \frac{\text{PERDAS (L)} + \text{DESTRUIÇÃO (D)}}{\text{FUEL (F)}} \quad (5.5)$$

A inversa da eficiência exergética representa o consumo de exergia requerido por uma instalação para a obtenção de um produto, representado pelo Custo Exergético Unitário ( $k$ ), o qual pode ser calculado pelas Equações (5.6) e (5.7):

$$k = \frac{1}{\eta_B} = \frac{\text{RECURSOS (F)}}{\text{PRODUTO (P)}} \quad (5.6)$$

$$k = 1 + \frac{\text{PERDAS (L)} + \text{DESTRUIÇÃO (D)}}{\text{PRODUTOS (P)}} \quad (5.7)$$

No processo de produção de cimento são considerados como FUEL: a exergia sob a forma de exergia elétrica fornecida para acionamento dos motores de ventiladores, exaustores, transportadores, moinhos, britadores, precipitadores eletrostático e máquinas diversas; a exergia fornecida pela queima de combustíveis nos queimadores do forno e pré-calcinador; exergia fornecida pelo ar de combustão primário, secundário ou terciário. No resfriador de clínquer, a exergia contida no clínquer é considerada FUEL, por ser a fonte de energia para o aquecimento do ar de combustão (ar primário, secundário ou terciário).

As matérias-primas utilizadas na reparação da farinha, nos processos de secagem e aquecimento, são consideradas como recursos (F), bem como o clínquer na saída do forno, na entrada e saída do processo de armazenamento do clínquer e na moagem do cimento.

Os gases quentes que são emitidos através da chaminé do forno para a atmosfera sem nenhum aproveitamento, são considerados como perdas (L), e no cálculo do Custo Exergético

o seu valor é considerado nulo. Igualmente o mesmo ocorre com as perdas de calor para o ambiente, pela transferência de calor através dos revestimentos de refratários do forno, paredes do resfriador de clínquer, pré-aquecedores e pré-calcinadores.

### 5.2.1 - Matriz de Incidência e Definição de F, P, e L

Para se realizar a análise termodinâmica de uma planta ou de um processo, esta deverá definir-se previamente como um conjunto de equipamentos ou subsistemas, de tal forma que todos eles constituam a planta como um todo, e de outro conjunto de fluxos de matéria, calor e trabalho, através dos quais estes se relacionam entre si e com o entorno da planta. Deste modo pode-se dizer que:

***Sistema Energético = Subsistemas ou Equipamentos + Fluxos de Materiais e/ou Energia***

A relação entre os fluxos e subsistemas se estabelece mediante uma matriz denominada Matriz de Incidência  $[A]_{n,m}$ . Nesta matriz  $n$  é o número de subsistemas e  $m$  o número de fluxos. Os elementos  $a_{i,j}$  desta matriz, assume o valor (+1) se o fluxo  $j$  entra no subsistema  $i$ , assume o valor (-1) se o fluxo  $j$  abandona o subsistema  $i$ , e o valor (0) se não existe relação física direta entre o fluxo  $j$  e o subsistema  $i$  (Valero et al., 1988).

No caso do processo estar em regime permanente, os balanços de massa, energia e exergia, poderá ser expresso pelo sistema de Equação (5.8), na forma simplificada por:

$$\mathbf{A} \times \mathbf{M} = \mathbf{0}; \quad \mathbf{A} \times \mathbf{E} = \mathbf{0}; \quad \mathbf{A} \times \mathbf{B} = \mathbf{D} \quad (5.8)$$

Onde:  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{B}$  são vetores coluna de dimensão  $m$ , cujos elementos correspondem respectivamente a massa, energia e exergia dos fluxos. O elemento  $d_i$  do vetor coluna  $\mathbf{D}$  de dimensão  $n$ , representa a exergia destruída no equipamento  $i$  devido às irreversibilidades internas (Valero; Lozano, 1988).

Em forma matricial, a definição:  $\mathbf{F} - \mathbf{P} - \mathbf{L}$  do sistema deverá cumprir a seguinte condição da Equação (5.9):

$$\mathbf{F} - \mathbf{P} - \mathbf{L} = \mathbf{D} \quad (5.9)$$

Em todas as condições de operação deve-se garantir que:

$$P \geq 0; F \geq 0; L \geq 0; P \geq F \text{ e } 0 \leq \eta_B \leq 1$$

## 5.2.2 – Regra de Atribuição de Custo

Valero et al. (1988) formularam um procedimento racional de atribuição de custos, baseado unicamente na Termodinâmica. As bases deste procedimento são:

- O custo exergético de um fluxo ( $B^*$ ), insumo ( $F^*$ ) ou produto ( $P^*$ ), é a quantidade real de exergia que foi necessária para produzi-lo.
- Uma análise detalhada de natureza global do processo em questão e do papel de cada subsistema na formação progressiva dos produtos finais é o único requisito para atribuir os custos exergéticos.
- O custo exergético dos fluxos de entrada de um equipamento deve ser rateado entre os fluxos úteis que abandonam o mesmo.

Desta forma, Valero et al. (1988), postulou um conjunto de proposições básicas, cuja a aplicação permitirá determinar o valor dos custos exergéticos dos fluxos dos processos em análise. Estas proposições foram definidas, conforme segue:

**Proposição 1:** *O custo exergético é uma propriedade conservativa, portanto o somatório de  $B^*$  é igual a zero, Equação (5.10):*

$$\sum B^* = 0 \quad (5.10)$$

**Proposição 2:** *Para as componentes múltiplas do combustível (Fuel ou Recursos) total de um subsistema, o custo exergético unitário dos fluxos de saída deve ser igual ao dos fluxos de entrada.*

Entende-se por custo exergético unitário de um fluxo (K), a razão entre o custo exergético e a exergia deste mesmo fluxo, Equação (5.11):

$$K = \frac{B^*}{B} \quad (5.11)$$

**Proposição 3:** *Se um subsistema tem um produto total formado por vários componentes, então todos eles terão o mesmo custo exergético.*

**Proposição 4:** *Se uma componente do produto tiver vários fluxos de saída, a todos eles se atribuirá o mesmo custo exergético unitário.*

**Proposição 5:** *Na ausência de uma atribuição externa aos fluxos de perdas do sistema, deve-se atribuir-lhes um custo exergético nulo, uma vez que não tem utilidade posterior*

**Proposição 6:** *Na ausência de um valor externo, o custo exergético dos fluxos de entrada ao sistema é igual a sua exergia. Se o fluxo “j” que entra em qualquer um dos subsistemas, externo a fronteira definida para o sistema, ou seja, proveniente do entorno, ou de outro subsistema, então:  $B_j^* = B_j$ .*

Considerando-se uma planta constituído de vários subsistemas, o balanço de custos exergético, baseado na Proposição 1, dos  $n$  subsistemas que o constituem corresponderá ao sistema de equações matricial representado pela Equação (5.12):

$$A \times B^* = 0 \quad (5.12)$$

Uma vez que o número de fluxos ( $m$ ) é sempre maior que o número de subsistemas ( $n$ ), a matriz “A” necessitará de  $(m-n)$  equações para a resolução do problema de atribuição de custos exergéticos a todos os fluxos. Deve-se então ser determinada uma matriz  $\alpha$  ( $m-n, m$ ) e um vetor coluna  $\omega$  ( $m-n$ ) que satisfaça a equação (5.13):

$$\alpha \times B^* = \omega \quad (5.13)$$

Valero et al. (1998), demonstrou que o sistema de equações necessário e suficiente para o cálculo dos custos exergéticos, possui a estrutura matricial conforme a Equação (5.15) :

$$\begin{bmatrix} A \\ \dots \\ \alpha \end{bmatrix} \times B^* = \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Se for definido:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A \\ \dots \\ \alpha \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} -Y^* \\ \dots \\ \omega \end{bmatrix}$$

Fazendo  $Y^* = 0$ , o sistema pode ser representado de uma forma mais compacta pela Equação (5.15):

$$A \times B^* = Y^* \quad (5.15)$$

Com a determinação da matriz de  $\alpha$  e do vetor coluna  $\omega$ , a Matriz de Incidência terá agora dimensões ( $m, m$ ), tendo, portanto, uma solução única.

Sendo conhecidos os valores das exergias dos  $m$  fluxos, a resolução do sistema dependerá da atribuição externa de valores ao vetor coluna  $Y^*$ , para que os custos exergéticos dos fluxos do sistema possam ser conhecidos.

Outros valores também podem ser calculados a partir da obtenção dos custos exergéticos para um dado sistema (Valero *et al.*, 1993):

- custo exergético unitário, dado pela Equação (5.16):

$$k_i^* = \frac{E_i^*}{E_i} \quad (5.16)$$

- irreversibilidade do sistema é definida pela Equação (5.17):

$$I_i = F_i - P_i \quad (5.17)$$

- porcentagem de irreversibilidade gerada no sistema em relação ao total de FUEL introduzido no sistema global é definida pela Equação (5.18):

$$\delta = \frac{I_i}{F_T} \quad (5.18)$$

- custo exergético unitário do FUEL é definido pela Equação (5.19):

$$k_{F_i}^* = \frac{F_i^*}{F_i} \quad (5.19)$$

- custo exergético unitário do produto é definido pela Equação (5.20):

$$k_{P_i}^* = \frac{P_i^*}{P_i} \quad (5.20)$$

### 5.2.3 – Custos Exergoeconômicos

O cálculo do custo monetário de uma planta para produção de cimento possui grande importância, principalmente, porque estes custos podem ser calculados nos vários subsistemas ou equipamentos que constituem o da planta.

A fabricação de cimento é um processo de consumo intensivo de energia térmica a qual possui um papel preponderante na formação do custo do produto. O custo econômico dos fluxos de uma instalação para produção de cimento está relacionado tanto com a eficiência térmica como também com os custos de amortização, energia elétrica, mão-de-obra e manutenção dos equipamentos envolvidos no processo.

Conforme a teoria desenvolvida por Valero *et al.* (1988), a matriz  $A(m,m)$  definida para o cálculo dos custo exergéticos ( $B^*$ ), multiplicada pelo vetor coluna  $\Pi$ , que representa os custos exergoeconômicos, será igual ao vetor coluna  $Z$ , que contém as atribuições econômicas externas para os fluxos de matéria, calor ou trabalho do sistema analisado. A seguir a representação na forma matricial pelas Equações (5.21) e (5.22):

$$A \times \Pi = Z \quad (5.21)$$

Onde:

- $\Pi_j$ , é a incógnita, que representa os custos exergoeconômicos dos  $m$  fluxos.

- $$Z = \begin{bmatrix} -Z \\ \dots \\ w_z \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

- $w_z$  é vetor que representa a atribuição externa de valores econômicos aos fluxos de entrada do sistema ou daquelas saídas que não formam o produto total.
- $-Z$  é o vetor que engloba os custos de capital, manutenção, amortizações, pessoal, instalação, etc.

### 5.3 - ANÁLISE TERMOCONÔMICA EM UM FORNO COM PRÉ-AQUECEDOR DE QUATRO ESTÁGIOS UTILIZANDO COMBUSTÍVEL MIX-A

Com a finalidade de realizar a análise termoeconômica o processo de produção de Cimento Portland foi dividido em seis volumes de controle (subsistemas), constituído conforme Tabela 5.1.

Tabela 5.1- Volumes de controle do processo de produção em forno com pré-aquecedor de 4 estágios.

<b>VOLUMES DE CONTROLE (subsistemas)</b>	<b>EQUIPAMENTOS OU ETAPAS</b>
<b>1</b>	Preparação da matéria-prima; moagem e homogeneização da farinha.
<b>2</b>	Pré-aquecedor, formado pelos três primeiros estágios da torre de ciclones; sistema de alimentação da farinha no primeiro estágio do pré-aquecedor.
<b>3</b>	Quarto estágio da torre de ciclones.
<b>4</b>	Forno-rotativo e seu sistema de acionamento.
<b>5</b>	Resfriador de clínquer.
<b>6</b>	Armazenamento, transporte do clínquer e moagem final do cimento.

A Figura 5.1 apresenta um esquema com a estrutura física da fábrica, a Tabela 5.2 identifica os vários fluxos envolvidos nesse processo e a Tabela 5.3 identifica a estrutura produtiva.

Os gases de exaustão do sistema de preaquecimento foram aproveitados em 30% para a secagem das matérias-primas no sistema de moagem, sendo o restante emitido para a atmosfera, após passar pelo precipitador eletrostático. O fluxo de exergia dos gases aproveitados é identificado na Figura 5.1 com o número 4, e o fluxo de exergia de número 5 identifica os gases perdidos, de valor exergético nulo.

O consumo de energia elétrica relativo ao acionamento do forno rotativo, sopradores, exaustores e grelhas do resfriador de clínquer, foram somados em um único fluxo, o de número 11, da Figura 5.1. O fluxo de exergia de número 6 representa o consumo de energia elétrica do sistema de exaustão do pré-aquecedor, bem como do sistema de alimentação da farinha. A energia elétrica consumida nos sopradores e alimentadores do sistema de queima, relativo ao ar primário, foi considerada no fluxo de número 13.

Tabela5.2- Descrição dos Fluxos no Processo de Produção de Cimento em Forno Rotativo com Pré-aquecedor de Ciclones de quatro estágios.

FLUXOS	DESCRIÇÃO DOS FLUXOS
1	Entrada de matérias-primas.
2	Energia elétrica - acionamento de motores e equipamentos de moagem e homogeneização da farinha.
3	Entrada da farinha no primeiro estágio do pré-aquecedor de ciclones.
4	Saída de gás do 1º estágio do pré-aquecedor para o moinho de farinha (aproveitamento de 30%).
5	Saída de gás do 1º estágio do pré-aquecedor para precipitador eletrostático (70%).
6	Energia elétrica para acionamento exaustor do forno e precipitador eletrostático e equipamentos de alimentação da farinha no pré-aquecedor.
7	Entrada da farinha pré-aquecida no quarto estágio do pré-aquecedor.
8	Saída do gás de exaustão do quarto estágio do pré-aquecedor.
9	Entrada da farinha parcialmente calcinado do forno rotativo.
10	Saída do gás de exaustão do forno rotativo.
11	Energia elétrica para acionamento do forno rotativo, exaustores de ar do resfriador de clínquer.
12	Entrada de combustível no queimador do forno rotativo.
13	Entrada de ar primário no forno rotativo.
14	Entrada de ar secundário aquecido no forno rotativo.
15	Saída do clínquer do forno rotativo e entrada no resfriador.
16	Saída do clínquer do resfriador de clínquer.
17	Energia elétrica para acionamento de motores e equipamentos para transporte de clínquer e moagem do cimento.
18	Saída do cimento.

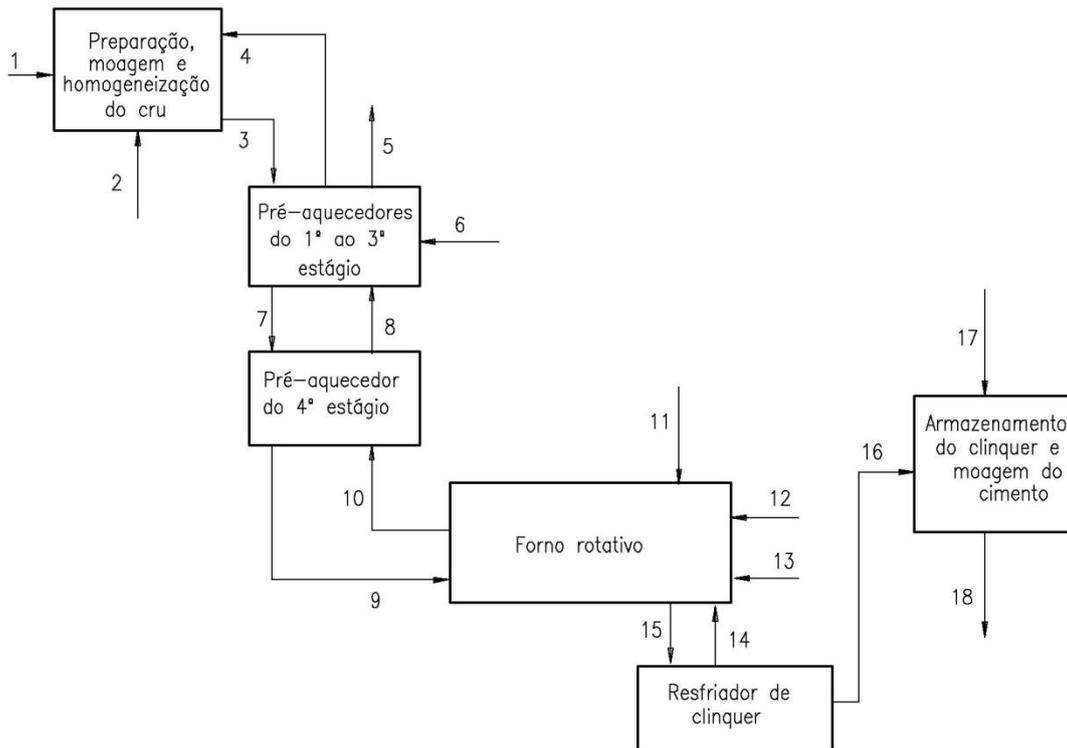


Figura 5.1 – Esquema representativo dos fluxos de Exergia num forno rotativo dotado de pré-aquecedor de ciclones de quatro estágios.

Tabela 5.3 - Definição de Fuel, Produto e Perdas no processo com forno rotativo com pré-aquecedor de ciclones de quatro estágios.

i	SUBSISTEMA	Fuel (F)	Produto (P)	Perdas (I)
1	Prep., moagem e homogeneização do cru	2+4	3-1	-
2	Pré-aquecedor (1º ao 3º Estágios)	8+6-4	7-3	5
3	Pré-aquecedor (4º Estágio)	10-8	9-7	-
4	Forno rotativo	14+13+12+11-10	15-9	-
5	Resfriador de clínquer	15-16	14	-
6	Armaz., transporte e moagem do cimento	17	18-16	-
	PLANTA	2+6+11+12+13+17	18-1	5

Baseado nas definições da teoria termoeconômica, foi obtida a matriz de incidência  $[A_1]$  e o vetor coluna  $[Y_1]$ , conforme o sistema linear de Equação (5.23).

$$\begin{bmatrix}
 1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -x_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -x_3 & -x_3 & -x_3 & -x_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -x_4 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 B_1^* \\
 B_2^* \\
 B_3^* \\
 B_4^* \\
 B_5^* \\
 B_6^* \\
 B_7^* \\
 B_8^* \\
 B_9^* \\
 B_{10}^* \\
 B_{11}^* \\
 B_{12}^* \\
 B_{13}^* \\
 B_{14}^* \\
 B_{15}^* \\
 B_{16}^* \\
 B_{17}^* \\
 B_{18}^*
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 w_1 \\
 w_2 \\
 w_3 \\
 w_4 \\
 w_5 \\
 w_6 \\
 w_7 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \quad (5.23)$$

Coefficientes da matriz

Os coeficientes da matriz  $[A_1]$ , definidos conforme a atribuição de valores de custos unitários e calculados pelas Equações (5.24), (5.25), (5.26) e (5.27), são:

$$\frac{B_3^*}{B_3} = \frac{B_7^*}{B_7} \quad \rightarrow \quad -x_1 = -\frac{B_3}{B_7} \quad (5.24)$$

$$-x_1 = \frac{4885,77}{17102,8} = -0,285671$$

$$\frac{B_8^*}{B_8} = \frac{B_{10}^*}{B_{10}} \quad \rightarrow \quad -x_2 = -\frac{B_8}{B_{10}} \quad (5.25)$$

$$-x_2 = \frac{323999,72}{43123,67} = -0,751321$$

$$\frac{B_{10}^*}{B_{10}} = \frac{B_{11}^* + B_{12}^* + B_{13}^* + B_{14}^*}{B_{11} + B_{12} + B_{13} + B_{14}} \rightarrow -x_3 = -\frac{B_{10}}{B_{11} + B_{12} + B_{13} + B_{14}} \quad (5.26)$$

$$-x_3 = \frac{43123,67}{96703,6} = -0,445937$$

$$\frac{B_{15}^*}{B_{15}} = \frac{B_{16}^*}{B_{16}} \quad \rightarrow \quad -x_4 = -\frac{B_{15}}{B_{16}} \quad (5.27)$$

$$-x_4 = \frac{42490,33}{23210,4} = -1,830659$$

O vetor coluna  $\mathbf{Y}_1$ , que representa os valores externos dados para os fluxos de entrada do processo em forno com pré-aquecedor de ciclones, tem os seguintes valores não nulos, representados pelos fluxos externos de matéria, energia elétrica e energia térmica, onde:

$$w_1 = B_1 = 4452,29; w_2 = B_2 = 3649,0; w_3 = B_6 = 1483,34; w_4 = B_{11} = 1405,84; \\ w_5 = B_{12} = 80280,0; w_6 = B_{13} = 122,85; w_7 = B_{17} = 3787,29$$

Substituindo os valores das exergias calculadas no Capítulo 4 (Tabela 4.13), nos  $w_i$  do vetor coluna  $[\mathbf{Y}_1]$ ; substituindo também os valores dos coeficientes  $x_i$  na Matriz  $[\mathbf{A}_1]$  e resolvendo o sistema de Equações através de métodos computacionais disponíveis no Mathcad chegou-se aos valores dos custos exergéticos ( $B^*$ ) dos fluxos conforme apresentados na Tabela 5.4.

Os valores de eficiência, custo exergético unitário e irreversibilidade gerada apresentados na Tabela 5.5, foram calculados com base nas definições da Tabela 5.3 para os fluxos correspondentes a Recursos (F), Produtos (P) e Perdas (L). O rendimento exergético foi calculado segundo a Equação (5.4) considerando os fluxos de Exergia (B). Os custos exergéticos unitários (k) foram calculados conforme a Equação (5.6) e os demais valores foram calculados pelas Equações (5.16), (5.17), (5.18), (5.19), e (5.20).

Tabela 5.4 - Resultados dos cálculos do valor dos fluxos de Exergia, Custo Exergético e Custo Exergético Unitário para produção de 22,269 kg/s de clínquer utilizando Combustível MIX-A.

Fluxo	Fluxo Exergético (B) kW	Custo Exergético (B*) kW	Custo Exergético Unitário $K^* = (B^*/B)$
1	4452,290	4452,290	1,0000
2	3649,000	3649,000	1,0000
3	4858,770	17735,644	3,6502
4	4279,590	9634,354	2,2512
5	---	---	1,0000
6	1483,340	1483,340	1,0000
7	17102,800	62429,228	3,6502
8	32399,720	52844,598	1,6310
9	25555,210	79920,210	3,1274
10	43123,670	70335,580	1,6310
11	1405,840	1405,840	1,0000
12	80280,000	80280,000	1,0000
13	122,850	122,850	1,0000
14	14894,910	75916,684	5,0968
15	42490,330	167310,004	3,9376
16	23210,400	91393,320	3,9376
17	3787,290	3787,290	1,0000
18	23247,030	95180,610	4,0943

Tabela 5.5 - Resultados dos Cálculos de Rendimento e Custos Unitários nos subsistemas de Produção de Cimento em Forno com Pré-aquecedor para produção de 22,269 kg/s de clínquer.

V.C.	FUEL (F) kJ/s	PRODUTO. (P) kJ/s	IRREV. (I) kJ/s	$\eta_b$	k	$\delta$	$K^*_{Fi}$	$K^*_{Pi}$
1	7928,59	406,48	7522,11	0,0513	19,505	0,0829	1,675	32,679
2	29603,47	12244,03	17359,44	0,4136	2,418	0,1913	1,510	3,650
3	10723,95	8452,41	2271,54	0,7882	1,269	0,0250	1,631	2,069
4	53579,93	16935,12	36644,81	0,3161	3,164	0,4039	1,631	5,160
5	19279,93	14894,91	4385,02	0,7726	1,294	0,0483	3,938	5,097
6	3787,29	36,63	3750,66	0,0097	103,393	0,0413	1,000	103,393
PLANTA	90728,32	18794,74	71933,58	0,2072	4,827	0,7928	1,000	4,827

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5.5, verifica-se que a destruição de exergia nesse sistema é dividida entre o pré-aquecedor (1° ao 3° estágios) e o forno-rotativo,

sendo que as irreversibilidades geradas correspondem respectivamente a 19,13% e 40,39% do total de exergia fornecida ao sistema.

## 5.4 - ANÁLISE TERMoeCONÔMICA EM UM FORNO COM PRÉ-AQUECEDOR DE QUATRO ESTÁGIOS UTILIZANDO COMBUSTÍVEL MIX-B

Para a análise termoeconômica do co-processamento de pneus inservíveis em um forno-rotativo com pré-aquecedor de ciclones de quatro estágios foi utilizada uma mistura de combustível denominada MIX-B, conforme especificado na Tabela 4.15. A matriz de incidência  $[A_2]$  é igual à matriz de incidência  $[A_1]$  defendida na Equação (5.23).

Os coeficientes da matriz  $[A_2]$ , definidos conforme a atribuição de valores de custos unitários e calculados pelas Equações (5.24), (5.25), (5.26) e (5.27), são:

$$-x_1 = \frac{4214,4}{14823,9} = -0,284298$$

$$-x_2 = \frac{28269,48}{37358,91} = -0,7567$$

$$-x_3 = \frac{43123,67}{96703,6} = -0,422444$$

$$-x_4 = \frac{37671,7}{21889,34} = -1,721007$$

O vetor coluna  $\mathbf{Y}_2$ , que representa os valores externos dados para os fluxos, tem os seguintes valores:

$$w_1 = B_1 = 3862,19; w_2 = B_2 = 3649; w_3 = B_6 = 1483,34; w_4 = B_{11} = 1405,4;$$

$$w_5 = B_{12} = 74224,46; w_6 = B_{13} = 134,0; w_7 = B_{17} = 3787,29$$

Substituindo estes valores no sistema de Equação (5.23) e resolvendo o sistema através do método disponíveis no Mathcad chegou-se aos valores dos custos exergéticos ( $B^*$ ) dos fluxos conforme apresentados na Tabela 5.6.

Os valores de eficiência, custo exerético unitário e irreversibilidade gerada são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.6 - Resultados dos cálculos do valor dos fluxos de Exergia, Custo Exerético e Custo Exerético Unitário para produção de 19,75 kg/s de clínquer em Forno com Pré-aquecedor, utilizando como combustível MIX-B.

Fluxo	Fluxo Exerético (B) kW	Custo Exerético (B*) kW	Custo Exerético unitário $K^* = (B^*/B)$
1	3862,190	3862,190	1,0000
2	3649,000	3649,000	1,0000
3	4214,400	14996,318	3,5584
4	3640,480	7485,128	2,0561
5	---	----	1,0000
6	1483,340	1483,340	1,0000
7	14823,900	52748,588	3,5583
8	28269,480	43754,058	1,5477
9	22177,700	66816,728	3,0128
10	37358,910	57822,198	1,5477
11	1405,840	1405,840	1,0000
12	74224,460	74224,460	1,0000
13	134,000	134,000	1,0000
14	12670,950	61111,116	4,8229
15	37671,700	145869,946	3,8721
16	21889,340	84758,830	3,8722
17	3787,290	3787,290	1,0000
18	21924,000	88546,120	4,0388

Tabela 5.7 - Resultados do Cálculo de Rendimento e Custos Unitários nos subsistemas de Produção de Cimento em Forno com Pré-aquecedor para produção de 19,75 kg/s de clínquer.

V.C.	FUEL (F) kJ/s	PRODUTO. (P) kJ/s	IRREV. (I) kJ/s	$\eta_b$	k	$\delta$	$K^*_{Fi}$	$K^*_{Pi}$
1	7289,48	352,21	6937,27	0,0483	20,696	0,0819	1,527	31,612
2	26112,34	10609,50	15502,84	0,4063	2,461	0,1831	1,446	3,558
3	9089,43	7353,80	1735,63	0,8090	1,236	0,0205	1,548	1,913
4	51076,34	15494,00	35582,34	0,3033	3,297	0,4202	1,548	5,102
5	15782,36	12670,95	3111,41	0,8029	1,246	0,0367	3,872	4,823
6	3787,29	34,66	3752,63	0,0092	109,270	0,0443	1,000	109,270
PLANTA	84683,93	18061,81	66622,12	0,2133	4,689	0,7867	1,000	4,689

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5.7, verifica-se que a destruição de exergia nesse sistema é dividida entre o pré-aquecedor (1° ao 3° estágios) e o forno- rotativo, sendo que as irreversibilidades geradas correspondem respectivamente a 18,31% e 42,02% do total de exergia fornecida ao sistema.

## 5.5 - ANÁLISE TERMOCÔNOMICA EM UM FORNO COM PRÉ-AQUECEDOR DE QUATRO ESTÁGIOS E PRÉ-CALCINADOR UTILIZANDO COMBUSTÍVEL MIX-C

As vantagens oferecidas pelo sistema constituído pelo forno rotativo com pré-aquecedor de ciclones e pré-calcinador, residem num menor carregamento térmico, quase o dobro de produção em relação a outro processo para um mesmo diâmetro de forno, possibilidade de operar com vários tipos de combustíveis e co-processamento de resíduos (Silva, 1994).

A mistura de combustível denominada MIX-C, conforme especificado na Tabela 4.22, contém 13,34% em raspa de pneus para ser co-processado,

Com a finalidade de realizar a análise termoeconômica o processo de produção foi dividido em seis volumes de controle (subsistemas), constituído conforme Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Volumes de controle do processo de produção em forno com pré-aquecedor de quatro estágios e pré-calcinador.

VOLUMES DE CONTROLE (subsistemas)	EQUIPAMENTOS OU ETAPAS
1	Preparação da matéria-prima; Moagem e homogeneização da farinha;
2	Pré-aquecedor, formada pelos três primeiros estágios da torre de ciclones; Sistema de alimentação da farinha no primeiro estágio do pré-aquecedor; Sistema de exaustão do sistema de queima.
3	Pré-calcinador e o quarto estágio do pré-aquecedor
4	Forno rotativo e sistema de acionamento.
5	Resfriador de clínquer.
6	Armazenamento, transporte do clínquer e moagem do cimento.

A Figura 5.2 apresenta um esquema com a estrutura física do processo. A identificação dos vários fluxos envolvidos nesse processo é apresentada na Tabela 5.9 e a identificação da estrutura produtiva na Tabela 5.10.

Os gases de exaustão do sistema de preaquecimento foram aproveitados em 30% para a secagem das matérias-primas no sistema de moagem, sendo o restante emitido para a atmosfera, após passar pelo precipitador eletrostático. O fluxo de exergia dos gases aproveitados é identificado na Figura 5.2 com o número 4. O fluxo com o restante de exergia contida no gás à saída do 1º estágio do pré-aquecedor, por não ter aproveitamento foi considerado nulo.

O consumo de energia elétrica relativo ao acionamento do precipitador eletrostático, do sistema de alimentação da farinha no pré-aquecedor e dos exaustores do forno, foram somados e representados por um único fluxo com o número 5. No fluxo de número 12 foi somado o consumo de energia elétrica para acionamento das grelhas do resfriador de clínquer, dos sopradores e acionamento do forno-rotativo.

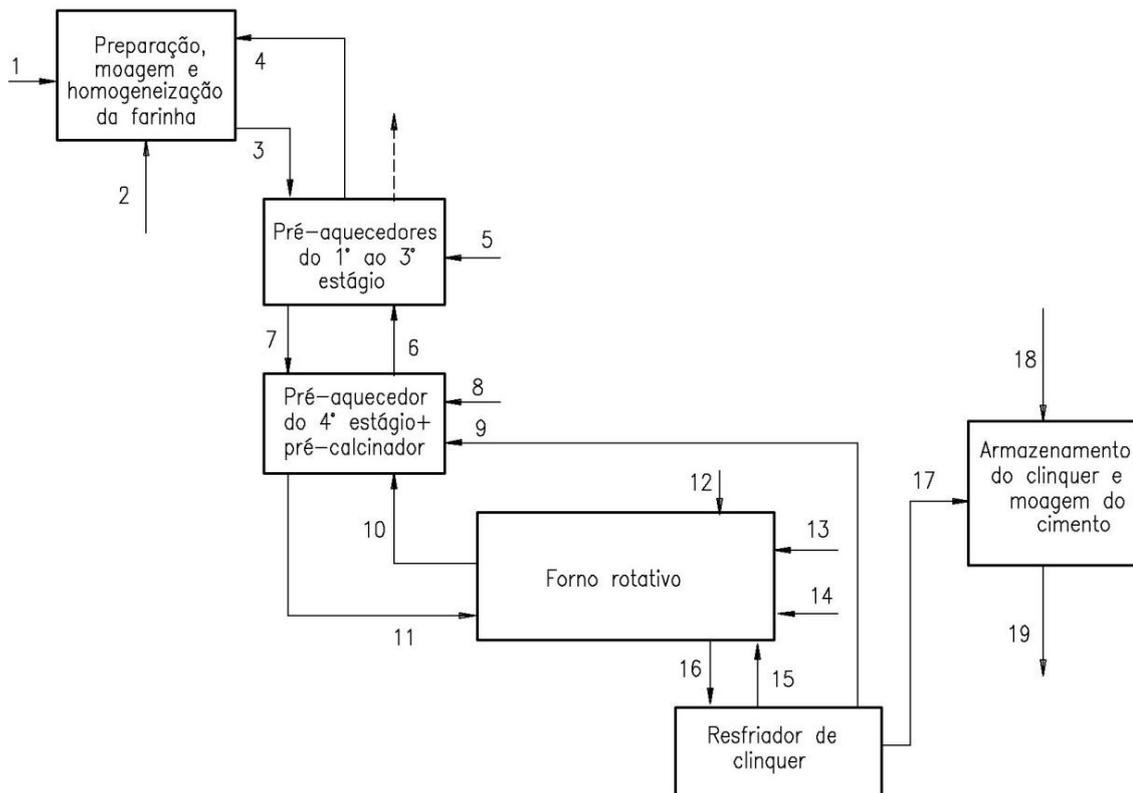


Figura 5.2 – Esquema representativo dos fluxos de Exergia num forno rotativo dotado de pré-aquecedor de ciclones de quatro estágios e pré-calcinador.

Tabela 5.9 - Descrição dos fluxos no processo de produção de cimento em forno-rotativo com pré-calcinador e pré-aquecedor de ciclones.

FLUXOS	DESCRIÇÃO DOS FLUXOS
1	Entrada de matérias-primas (calcário, argila, areia e minério de ferro).
2	Energia elétrica - acionamento de motores e equipamentos das etapas de preparação, moagem e homogeneização do cru.
3	Entrada do cru no primeiro estágio do pré-aquecedor de ciclones
4	Saída de gás do primeiro estágio do pré-aquecedor de ciclones
5	Energia elétrica: acionamento exaustor do forno e precipitador eletrostático, equipamentos de alimentação da farinha no pré-aquecedor.
6	Saída do gás de exaustão do quarto estágio do pré-aquecedor.
7	Entrada da farinha no pré-aquecido no pré-calcinador.
8	Entrada do combustível no pré-aquecedor.
9	Entrada de ar terciário no pré-calcinador vindo do resfriador de clínquer.
10	Saída do gás de exaustão do forno rotativo.
11	Entrada do cru parcialmente calcinado no forno rotativo.
12	Energia elétrica: acionamento do forno rotativo, exaustores de ar do resfriador de clínquer.
13	Entrada de combustível no queimador principal do forno rotativo.
14	Entrada de ar primário no forno rotativo.
15	Entrada de ar secundário aquecido no forno rotativo.
16	Saída do clínquer do forno rotativo e entrada no resfriador.
17	Saída do clínquer do resfriador de clínquer.
18	Energia elétrica: acionamento de motores e equipamentos para transporte de clínquer e moagem do cimento.
19	Saída do Cimento

Tabela 5.10 - Definição de FUEL, PRODUTO e PERDAS no processo, com forno- rotativo com pré-calcinador e pré-aquecedor de ciclones de quatro estágios.

i	Subsistema	Fuel (F)	Produto (P)	Perdas (L)
1	Prep., moagem e homog. da pasta	2+4	3-1	-
2	Pré-aquecedor (1° ao 3° estágios)	6+5-4	7-3	-
3	Pré-calcinador + 4° estágio	10+9+8-6	11-7	-
4	Forno-rotativo	15+14+13+12-10	16-11	-
5	Resfriador de clínquer	16-17	15	
6	Armaz., transporte e moagem do cimento	18	19-17	
	PLANTA	2+5+8+12+ 13+14+18	19-1	-

Baseado nas definições da teoria termoeconômica, foi obtida a matriz de incidência  $[A_3]$  e o vetor coluna  $[Y_3]$ , conforme o sistema linear de Equação (5.28).

$$\begin{bmatrix}
 1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & -x_1 & -x_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -x_2 & -x_2 & -x_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -x_4 & -x_4 & -x_4 & -x_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -x_5 & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \cdot x
 =
 \begin{bmatrix}
 B_1^* \\
 B_2^* \\
 B_3^* \\
 B_4^* \\
 B_5^* \\
 B_6^* \\
 B_7^* \\
 B_8^* \\
 B_9^* \\
 B_{10}^* \\
 B_{11}^* \\
 B_{12}^* \\
 B_{13}^* \\
 B_{14}^* \\
 B_{15}^* \\
 B_{16}^* \\
 B_{17}^* \\
 B_{18}^* \\
 B_{19}^*
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 w_1 \\
 w_2 \\
 w_3 \\
 w_4 \\
 w_5 \\
 w_6 \\
 w_7 \\
 w_8 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \quad (5.28)$$

Os coeficientes da matriz  $[A_3]$ , definidos de acordo com as proposições de atribuições de custos são representados pelas Equações (5.29), (5.30), (5.31), (5.32) e (5.33):

$$\frac{B_4^*}{B_4} = \frac{B_5^* + B_6^*}{B_5 + B_6} \quad \rightarrow \quad -x_1 = -\frac{B_4}{B_6 + B_5} \quad (5.29)$$

$$\frac{B_6^*}{B_6} = \frac{B_8^* + B_9^* + B_{10}^*}{B_8 + B_9 + B_{10}} \quad \rightarrow \quad -x_2 = -\frac{B_6}{B_8 B_9 + B_{10}} \quad (5.30)$$

$$\frac{B_9^*}{B_9} = \frac{B_{15}^*}{B_{15}} \quad \rightarrow \quad -x_3 = -\frac{B_9}{B_{15}} \quad (5.31)$$

$$\frac{B_{10}^*}{B_{10}} = \frac{B_{12}^* + B_{13}^* + B_{14}^* + B_{15}^*}{B_{12} + B_{13} + B_{14} + B_{15}} \rightarrow -x_4 = -\frac{B_{10}}{B_{12} + B_{13} + B_{14} + B_{15}} \quad (5.32)$$

$$\frac{B_{16}^*}{B_{16}} = \frac{B_{17}^*}{B_{17}} \rightarrow -x_5 = -\frac{B_{16}}{B_{17}} \quad (5.33)$$

Coeficientes da matriz  $[A_3]$ , substituindo os valores das exergias nas Equações (5.29), (5.30), (5.31), (5.32) e (5.33) vem:

$$-x_1 = \frac{4641,17}{45193,75} = -0,102695$$

$$-x_2 = \frac{42900,75}{92982,13} = -0,461387$$

$$-x_3 = \frac{11181,41}{11520,64} = -0,970555$$

$$-x_4 = \frac{16180,04}{57185,37} = -0,28294$$

$$-x_5 = \frac{67368,6}{37288,5} = -1,806686$$

O vetor coluna  $\mathbf{Y}_3$ , que representa os valores externos dados para os fluxos, tem os seguintes valores:

$$w_1 = B_1 = 8504,5; w_2 = B_2 = 5682,0; w_3 = B_5 = 2293; w_4 = B_8 = 65620,68; w_5 = B_{12} = 1802,0; w_6 = B_{13} = 43742,25; w_7 = B_{14} = 120,48; w_8 = B_{18} = 5904,0$$

Substituindo estes valores no sistema de Equação (5.28) e resolvendo o sistema através do método disponível no Mathcad, chegou-se aos valores dos custos exergéticos dos fluxos ( $B^*$ ) conforme apresentados na Tabela 5.11.

Os valores de eficiência, custo exergético unitário e irreversibilidade gerada são apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.11 - Resultados dos cálculos dos valores dos fluxos de Exergia, Custo Exergético e Custo Exergético Unitário para produção de 34,72 kg/s de clínquer em Forno com Pré-aquecedor de quatro estágios e pré-calcinador utilizando combustível MIX-C.

Fluxo	Fluxo Exergético (B) kW	Custo Exergético (B*) kW	Custo Exergético unitário $K^* = (B^*/B)$
1	8504,50	8844,92	1,0400
2	5682,00	5682,00	1,0000
3	8931,27	21600,10	2,4185
4	4641,17	7073,16	1,5240
5	2293,00	2293,00	1,0000
6	42900,75	66582,40	1,5520
7	26689,50	83402,30	3,1249
8	65620,68	65620,68	1,0000
9	11181,41	50914,20	4,5535
10	16180,04	27774,40	1,7166
11	56957,80	161129,00	2,8289
12	1802,00	1802,00	1,0000
13	43742,25	43742,25	1,0000
14	120,48	120,48	1,0000
15	11520,64	52458,90	4,5535
16	67368,60	231518,00	3,4366
17	37288,50	128145,00	3,4366
18	5904,00	5904,00	1,0000
19	37345,50	134049,00	3,5894

Tabela 5.12 - Resultados dos Cálculos de Rendimento e Custos Unitários nos subsistemas, para produção de 34,72 kg/s de clínquer em Forno com Pré-aquecedor de quatro Estágios e Pré-calcinador utilizando como combustível o MIX-C.

V.C.	FUEL (F) kJ/s	PRODUTO. (P) kJ/s	IRREV. (I) kJ/s	$\eta_b$	k	$\delta$	$K^*_{Fi}$	$K^*_{Pi}$
1	10323,17	426,77	9896,40	0,0413	24,189	0,0830	1,236	29,888
2	40552,58	17758,23	22794,35	0,4379	2,284	0,1911	1,524	3,480
3	50081,38	30268,30	19813,08	0,6044	1,655	0,1661	1,552	2,568
4	41005,33	10410,80	30594,53	0,2539	3,939	0,2565	1,716	6,761
5	30080,10	11520,64	18559,46	0,3830	2,611	0,1556	3,437	4,553
6	5904,00	57,00	5847,00	0,0097	103,579	0,0490	1,000	103,579
PLANTA	119281,41	28841,00	90440,41	0,2418	4,136	0,7582	1,049	4,341

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5.12, verifica-se que a destruição de exergia nesse sistema é dividida entre o pré-aquecedor (1° ao 3° estágios), com 19,11%, o forno rotativo com 25,65%, o pré-calcinador mais o quarto estágio, com 16,61% e o resfriador de clínquer 15,56%. Nota-se que as irreversibilidades geradas nesse processo estão distribuídas nos quatro principais volumes de controle, o que o diferencia dos dois processos anteriormente analisados.

## Capítulo 6

# CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

## 6.1- CONCLUSÕES

O cimento é um dos mais importantes materiais a serviço da construção civil, além de ser o material de construção de maior uso no mundo é o principal produto em quantidade, fabricado industrialmente pelo homem. A indústria de cimento é quarta maior consumidora de energia no mundo (Benoit e Hamel, 1993), e o custo da energia representa 30% a 40% do custo total de produção do cimento (CEMBEREAU, 2004). Este consumo intensivo de energia durante o processo de fabricação motivou pesquisas em todo o mundo, na busca de medidas para diminuição do consumo energético. As principais alternativas e inovações visando a redução no consumo de energia na fabricação de cimento Portland encontradas foram:

- O uso de escórias granuladas de alto-forno na composição de novos tipos de cimentos denominados Cimento Portland Composto e Cimento Portland de Alto-Forno;
- Utilização de outros aditivos, como cinzas volantes que é um resíduo de centrais termoeletricas, na fabricação de cimento;
- Utilização de autômatos programáveis (PLC's), em substituição dos sistemas de automação eletromecânicos, visando pelo controle do processo e sua estabilização, uma redução no consumo de energia;
- Substituição do processo de via úmida com fornos longos, alimentados por pastas, pelo processo de via seca, com fornos rotativos de menor comprimento equipados

com pré-calcinador e pré-aquecedores de ciclones de 4 a 6 estágios, que permitem uma importante redução do consumo específico de energia na produção de clínquer;

- Fornos revestidos internamente com novos tipos de refratários que reduzem as perdas de calor, e suportem a agressão de substâncias químicas contidas nos combustíveis alternativos co-processados.
- Substituição dos moinhos horizontais de bolas por moinhos verticais, reduzindo o consumo de energia elétrica, principalmente na moagem do cru;
- Introdução do enchimento e empacotamento mecanizados dos sacos de cimento;
- Introdução de balanças eletrônicas para dosagem das matérias-primas e pesagem dos sacos de cimento.

Aliado a estas e outras inovações tecnológicas com vistas a um menor consumo de energia, tem sido intensa a pesquisa para a produção de clínquer mineralizado. Por outro lado, paralelamente a estas inovações, as indústrias de cimento passaram a utilizar o co-processamento de resíduos, advindos de outras cadeias produtivas. Esta nova tecnologia permite a destruição térmica de substâncias diversas, perigosas ou não-inertes, contribuindo desta maneira, para redução do enorme passivo ambiental criado pela sociedade moderna.

No Capítulo 4 deste trabalho foi feita uma análise exérgica de três processos de produção de clínquer. Sendo a primeira análise foi realizada em um forno rotativo dotado de pré-calcinador de quatro estágios, queimando uma mistura de combustível denominada MIX-A. A segunda em um forno com as mesmas características, porém queimando uma mistura de combustíveis denominada de MIX-B que contém 15,4% em peso de raspas de pneus inservíveis. A terceira em um forno dotado de pré-aquecedor de ciclones de quatro estágios e pré-calcinador, queimando uma mistura denominada MIX-C que contém 10,8% em peso de raspas de pneus inservíveis. Os resultados da eficiência racional dos três processos analisados mostram que a eficiência térmica global do processo de produção de clínquer é baixa. No forno com pré-aquecedor de quatro estágios queimando a mistura de combustíveis MIX-A, a eficiência foi de 22,65% , e queimando o MIX-B foi de 21,84%. O forno com pré-calcinador e pré-aquecedor de ciclones de quatro estágios apresentou um aumento de eficiência utilizando o MIX-C, da ordem de 24,50%. Se comparado ao forno com pré-aquecedor de ciclones de quatro estágios utilizando MIX-B, o forno com pré-calcinador apresentou aumento da eficiência de: 9,2% nos pré-aquecedores, 15% no sistema formado pelo 4<sup>o</sup> Estágio+Pré-calcinador + Forno, e de 2,5% no resfriador de clínquer, e um ganho na Eficiência Global do sistema da

ordem de 12%. Tem-se ainda que o co-processamento de pneus neste processo, com alimentação no pré-calcinador, permite ainda uma redução na quantidade de  $\text{NO}_x$  gerado.

Os sistemas com pré-calcinador apresentam uma maior eficiência porque até 60% do combustível necessário para produção do clínquer pode ser queimado no pré-calcinador, para calcinar até 90% do calcário presente na mistura da farinha antes da entrada do forno. Este tipo de processo é termicamente mais eficiente porque o calor proveniente da queima secundária é liberado justamente onde há uma maior necessidade, onde ocorre a calcinação, uma reação fortemente endotérmica.

Isto vem mostrar que a escolha adequada dos combustíveis e resíduos a serem co-processados, e o tipo de instalação de queima, pode trazer ganhos energéticos se bem analisados.

No Capítulo 5 foi feita uma análise termoeconômica dos processos, a partir dos cálculos da exergia dos fluxos nos volumes de controles, obtidas no Capítulo 4. A análise termoeconômica foi feita com base na teoria desenvolvida por Valero et al. (2001).

Analisando os resultados dos custos exergéticos, custos exergéticos unitários, custos unitários nos subsistemas e rendimentos dos três processos verifica-se que, no sistema de forno com pré-aquecedor queimando a mistura de combustíveis denominada MIX-A, a destruição de exergia foi dividida entre o pré-aquecedor (1° ao 3° estágios), com 19,13% e o forno rotativo com 40,39%. No sistema de forno com pré-aquecedor queimando a mistura de combustível MIX-B, a destruição de exergia foi dividida entre o pré-aquecedor (1° ao 3° estágios), com 18,31%, o forno rotativo com 42,02%. É importante observar que no sistema de forno com pré-aquecedor e pré-calcinador queimando a mistura de combustível MIX-C, a destruição de exergia foi dividida mais uniformemente entre os subsistemas: pré-aquecedor (1° ao 3° estágios), com 19,11%; o forno rotativo com 25,65%; o pré-calcinador mais o quarto estágio, com 16,61%; e o resfriador de clínquer com 15,56%. Nota-se que as irreversibilidades geradas nesse processo estão distribuídas nos quatro principais volumes de controle, o que diferencia dos dois processos, utilizando o MIX-A e o MIX-B.

Assim, fica evidenciada que a melhor distribuição das etapas do processo contribui para um aumento da eficiência global, conforme resultados apresentados. Um alto grau de calcinação fora do forno rotativo, no pré-calcinador com fornecimento de ar terciário, é um

dos fatores que aumentam a eficiência global do sistema, pois o forno rotativo é o grande gerador de irreversibilidades no sistema.

## **7.2 - RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Sugere-se para trabalhos futuros as seguintes recomendações:

- Realizar uma análise termoeconômica para instalações que possuam pré-aquecedores de ciclones de 5 e 6 estágios, com pré-calcinador com ar terciário.
- Realizar uma análise exergoeconômica para as três misturas de combustíveis aqui apresentados.
- Analisar os impactos ambientais e financeiros do uso de cada mistura de combustível aqui apresentada.
- Realizar uma análise termoeconômica e exergoeconômica do processo de produção de clínquer com co-processamento de resíduos industriais que contenha substâncias mineralizantes e fundentes.
- Realizar uma análise termoeconômica e exergoeconômica do processo de produção de cimento com co-processamento de resíduos industriais e adições ativas

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARI, T., THEMELIS, N. J. and WERNICH, I. K. (1999).** *Resource Recovery from Used Rubber Tires, Resources Policy*, v 25, pp 179 – 188. Pergamon Press, Elsevier Science Ltd,
- ASSIS, C, F, C. (2008)** *Caracterização de carvão vegetal para sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte*. Dissertação Mestrado. Escola de Minas. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 165p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP).** *Procedimentos para análises químicas do cimento e suas matérias-primas*. São Paulo, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP).** *Guia básico de utilização do cimento Portland*. São Paulo, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP).** *Forno de cimento: solução a eliminação de resíduos industriais*. São Paulo, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** EB 1: *cimento Portland comum*. Rio de janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** EB 2: *cimento Portland de alta resistência inicial*. Rio de janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** EB 208: *cimento Portland de alto forno*. Rio de janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** EB 758: *cimento Portland pozolânico*. Rio de janeiro, 1991.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** EBR 11578 : *cimento Portland composto*. Rio de Janeiro, 1991.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** EBR 5737 : *cimento Portland resistente a sulfatos*. Rio de Janeiro, 1992.

**BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (2008)**, Ano base 2007. Brasília: Ministério de Minas e Energia.

**BEJAN, A. TSATSARONIS, G. and MORAN, M., (1996)**, *Thermal Design and Optimization*, John Wiley & Sons, New York, USA.

**BEN (2008)**, Balanço Energético Nacional. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Energia. Disponível em <[www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br)>, acessado em 15/01/2009.

**BENOIT. M. R., HAMEL, B. B. (1993)**, “*Tratamento e destruição de resíduos perigosos em fornos de cimento Portland.*” Revista brasileira de engenharia química. São Paulo, Vol. XIII, N° 2, dezembro, 1993.

**BEUER, M.B. (1986)** Editor: *Encyclopedia of Material Science and Engineering*. Pergamon Press. Vol. I Great Britain.

**BOGUE, R. H. (1955)** *The Chemistry of Portland Cement*. New York: Reinhold Publishing Corporation, 572p.

**BUGALHO ADONIRAM (1998)**. *Competitividade das Indústrias de Cimento do Brasil e da América do Norte..* Dissertação Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas, 128p.

**CAMÕES, A (2005)**. *Betões de elevado desempenho com volume de cinzas volantes*. Revista de Engenharia Cívil n° 23, Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil, Azurém, Portugal.

- CARNEIRO, A. C. O. (2007)** *Aproveitamento de finos de carvão vegetal como fonte energética, Centro Brasileiro para a Conservação da Natureza e desenvolvimento sustentável*. In: IV Simpósio de meio ambiente, Universidade Federal de Viçosa, UFV.
- CARPIO, R. C. (2005)** *Otimização no Co-processamento de Resíduos na Indústria do Cimento Envolvendo Custos, Qualidade e Impacto Ambiental*. Tese Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 194P.
- CEMBUREAU (2007)**, *Alternative Fuels in cement Manufacture*. Technical and Environmental Review. Disponível em <<http://www.cembureau.be>>, acessado em 18/05/2008.
- CEMBUREAU (1999)**, The European Cement Association. *Best Available Techniques For The Cement Industry*. 1999, 237p. Disponível em <<http://www.cembureau.be>>, acessado em 15/09/2007.
- CENTURIONE, S. L. (1992)** *Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland*. Dissertação de mestrado, Instituto de Geologia, Universidade de São Paulo, USP, 155 p.
- CHATTERJEE, A. K. (1993)**, “*Special & New Cements in a Historical Perspective*”. In: Congresso Brasileiro de Cimento, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, São Paulo, v. II, pp. 693 – 793.
- COMMANDRÉ, J. M., SALVADOR, S. (2005)** *Lack of Correlation between the Properties of a Petroleum Coke and its Behavior During Combustion*, Fuel Processing Technology, v 86.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (1999)**, “Resolução 258°, de 26 de agosto”, MMA –Ministério do Meio Ambiente, disponível em acessado em 12/03/2007 <<http://www.mma.gov.br>>.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (2006)**, “Resolução 382°, de 26 de dezembro”, MMA –Ministério do Meio Ambiente, disponível em acessado em 10/12/2007 <<http://www.mma.gov.br>>.

- CORÁ, R. (2006)**, *Aspectos Técnicos e Ambientais do Uso do Carvão Mineral em Caldeiras*, Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 130p.
- DUARTE, V. C. (1999)**, *Estudo da Transferência de Calor em Fornos Rotativos da Indústria de Cimento, utilizando o Método de Elementos Finitos*, Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 180p.
- EPE – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2007)**, “balanço dos centros de transformação, capítulo 6”, disponível em:  
<[http://www.qprocura.com.br/consumo\\_de\\_energia](http://www.qprocura.com.br/consumo_de_energia)>, acessado em 15/12/2007,
- FONSECA, M. A. S.; CARMO, A. J. B.; TERADA, O. A. (1990)**, “*Desenvolvimento e Implantação do Sistema Integrado de Planejamento Energético*”: Estudos Setoriais Cimento. Eletrobrás e IPT, São Paulo.
- FREEMAN, H. M. (1983)**, “*Hazardous Waste Destruction Processes*”. Environmental Progress. Vol. 2, n° 4, november 1983. pp. 205 – 210.
- GARCIA, R. I. (2002)**, *Caracterização dos Principais Materiais Envolvidos em uma Produção Industrial de Cimento Portland Utilizando Co-processamento de Resíduos*, Tese de Doutorado em Ciências dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC, Rio, 132 p.
- GARRETT, H. M. (1985)**, “*Precalciners Today A Review*”. Rock Products, July, pp 39 – 61.
- GOMIDE, R. (1979)**, *Estequiometria Industrial*, 2 ed. CENPRO, São Paulo, 430 p.
- GRANGER, J.E., Clark, G.A. (1991)**. “*Fuel characterization of coal/shredded tire blends Proceedings of the Electric Power*”. In: Conference on Waste Tires as a Utility Fuel. Research Institute (EPRI) EPRI, San Jose, CA. Apud (T. Amari).
- JUNIOR, S. B. (1993)** *Co-processamento de Resíduos Industriais em Fornos de Cimento*. Revista Brasileira de Engenharia Química. São Paulo, v. XIII. N° 2, pp. 22 – 25, dezembro,

- KOTAS, T. J. (1985)**, *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. London: Butterworths, 294p
- KWECH, L. (1986)**, *Preclacining in the Cement Industry*. Zement-Kak-Gips, Nr 9.
- LOZANO, M. A.; VALERO, A.; GALLAR, J. (1989)**, *Teoría del coste exergético I*.  
Conceptos básicos. Publicación interna. Área de Máquinas e Motores Térmicos.  
Universidad de Zaragoza. Dpto. de Ingeniería Mecánica. Abril,. Universidad de  
Zaragoza. Dpto.Ingeniería Mecânica. Disponível em:  
< <http://www.teide.cps.unizar.es> >. Acesso em: 2007.
- LOZANO, M. A.; VALERO, A. (1993)**, *Theory of the exergetic cost Energy*. Pergamon  
Press. Universidad de Zaragoza, Dpto. de Ingeniería Mecánica v.18, pp 939 – 960  
Disponível em: <<http://www.teide.cps.unizar.es>>. Acesso em: 2007.
- MARINGOLO, V. (2001)**, *Clínquer Co-processado: Produto de Tecnologia Integrada para  
Sustentabilidade e Competitividade da Indústria de Cimento*, Tese Doutorado em  
Mineralogia Aplicada, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 177p.
- PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. (1982)**, *Chemical Engineers Handbook*, International  
Student Edition. 5 Ed.
- PINHEIRO, P.C.C. (2006)**, *A produção de carvão vegetal: teoria e prática*. Elmo Viana,  
Maria Emília Antunes de Rezende, Paulo César da Costa Pinheiro, Ronaldo Santos  
Sampaio. Belo Horizonte: Edição do autor.
- SALOMON, V. G. (2002)**, *Avaliação dos Efeitos da Presença de Metais Pesados nos  
Resíduos Co-processados Quando Utilizados como Combustíveis Alternativos e  
Matéria-Prima na Indústria Cimenteira*, Dissertação Mestrado, em Engenharia  
Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 143p
- SIECESC (2008)**, Sindicato da Indústria da Extração de Carvão do Estado de SC. Disponível  
em: <<http://www.siecesc.com.br>>>. Acesso em: 24-07-2008.

- SILVA, D. C. (2004)**, *Análise Termoeconômica de uma Usina Termelétrica a Carvão Mineral*, Dissertação Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 275p.
- SILVA, R. J. (1994)**, *Análise Energética de Plantas de Produção de Cimento Portland*, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 242p.
- SANTI, A. M. M. (2003)**, *Co-incineração e Co-processamento de Resíduos Industriais Perigosos em Fornos de Clínquer: Investigação no maior pólo produtor de cimento do país, Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG, sobre os riscos ambientais, e propostas para a Segurança Química*, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 227p
- SANTI, A. M. M. & NEBRA, S. A (1996)**, “*Fornos de cimento: incineração de resíduos ou queima de combustíveis alternativos?*” In: VII Congresso Brasileiro de Energia, Anais [CD] Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. p: 645-57.
- SWAIN, A. K.** “*Material Mix Control in Cement Plant Automation*”, Control Systems Magazine, IEEE, v 15, pp 23 – 27.
- SZARGUT, Jan; MORRIS D. R; STEWARD, F. R. (1988)** “*Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*”, New York: HEMISPHERE, 324p
- TAYLOR, H. F. W. (1992)**, *Cement Chemistry*. London: Thomas Telford, 459p.
- TOKYAY, M. (1998)**, *Effect of chemical composition of clinker on grinding energy requirement*, , Ankara, Turkey, Cement and Concrete Research, p.. 531–535
- WEBER, P. (1963)**, *Heat Transfer in Rotary Kilns*. Zement-Kalk-Gips, English Special Edition, Bauverlag GMBH, Germany.