

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
ROBSON LOPES

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE COLAGEM NO FORNO DE CLÍNQUER:
UM ESTUDO DE CASO NA FABRICAÇÃO DE CIMENTO**

FORMIGA - MG
2009

ROBSON LOPES

ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE COLAGEM NO FORNO DE CLÍNQUER:
UM ESTUDO DE CASO NA FABRICAÇÃO DE CIMENTO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação geral de graduação do UNIFOR-MG, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof^o. Marcelo C. Ramos

Co-orientador: Prof^a. Jussara Maria S. R. Oliveira

FORMIGA - MG
2009

ROBSON LOPES

ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE COLAGEM NO FORNO DE CLÍNQUER:
UM ESTUDO DE CASO NA FABRICAÇÃO DE CIMENTO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenação geral de graduação do UNIFOR-MG, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof^o. Marcelo C. Ramos

Co-orientador: Prof^a. Jussara Maria S. R. Oliveira

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Marcelo Carvalho Ramos
Orientador

Examinador - 01

Formiga - Junho de 2009.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus todo poderoso, por que sem suas imensas bênçãos sobre minha vida, nada teria sucesso inclusive este trabalho.

Agradeço à minha esposa Natália e meu filho Isaque pela compreensão, pelo incentivo e apoio incondicional.

Aos meus colegas de classe que nesses longos quatro anos de estudo souberam me entender e apoiaram nos momentos difíceis.

Ao meu orientador Professor Marcelo e aos professores que através de suas experiências me deram dicas importantes no conteúdo do trabalho. A UNIFOR por ter contribuído no meu desenvolvimento acadêmico e crescimento intelectual.

A direção da empresa e aos meus colegas de trabalho, que de uma maneira ou de outra, muito contribuíram para que eu pudesse concluir este trabalho.

A todas as pessoas que de uma maneira ou de outra contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão de mais esta etapa de minha vida, meu muito obrigado!

“Porque melhor é a sabedoria do que os rubins;
e de tudo o que se deseja nada se pode comparar a ela”.

Provérbios cap. 8 verso 11.

RESUMO

Este trabalho consiste na elaboração de um estudo focado na análise do processo de produção do clínquer, produto principal para fabricação do cimento Portland. Este trabalho se baseia numa análise do mecanismo de formação, dissolução e queda da colagem no forno rotativo e na análise da formação de colagem na torre de pré-aquecimento (caixa de fumaça). Estes locais são onde se processam a altas temperaturas, as reações de obtenção do clínquer. A análise destes mecanismos identifica as principais variáveis de processo que influenciam direta ou indiretamente no processo comprovando através de dados reais a veracidade do estudo teórico. Busca-se com este estudo a possibilidade de contribuir com a eficiência do processo produtivo através de informações sobre ações preventivas de auxílio à tomada de decisão, considerando que a indústria cimenteira busca incessantemente por resultados que propiciem processos produtivos alinhados ao desenvolvimento sustentável e assegurem o nível de competitividade da empresa perante o mercado globalizado.

Palavras-chave: Produção de clínquer. Mecanismo de formação e dissolução de colagens. Cimento Portland.

ABSTRACT

This work is the elaboration of a study focused on analysis of the production process of clinker, the main product for the manufacture of Portland cement. This work is based on an analysis of the mechanism of formation, dissolution and collapse of the rotary kiln sizing and analysis of the formation of bonding in the pre-heating tower (smoke box). These are places where you handle the high temperatures, the reactions of production of clinker. The analysis of these mechanisms identifies key process variables that influence directly or indirectly through the process of proving the veracity of the actual theoretical study. Search with this study the possibility of contributing to the efficiency of the production process by providing information on preventive actions to aid decision-making, whereas the cement industry by continually search results that provide productivity processes aligned to sustainable development and ensure the level competitiveness of the company to the global market.

Keywords: Production of clinker. Mechanism of formation and dissolution of collages. Portland cement.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Problema	17
1.2 Justificativa	18
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo geral	19
2.2 Objetivos específicos.....	19
3 REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1 A História do Cimento Portland.....	20
3.2 Características e propriedades do cimento	21
3.2.1 Composição	23
3.2.2.1 O clínquer.....	23
3.2.2.2 As adições.....	23
3.3 A qualidade do cimento	26
3.4 Processo de Fabricação do cimento Portland	27
3.4.1 A mineração ou extração.....	28
3.4.2 Dosificação e pré-homogeneização	31
3.4.3 Moagem e homogeneização da matéria-prima dosada	32
3.4.4 Preparação dos combustíveis	33
3.4.5 O processo de queima do clínquer.....	37
3.4.6 Composição mineralógica do clínquer.....	43
3.4.7 Forno rotativo	45
3.4.8 Resfriamento.....	47
3.4.9 A moagem do cimento Portland	49
3.5 Colagem	52
3.5.1 A colagem da zona de clinquerização	53
3.5.1.1 A formação descontrolada de Colagem.....	55
3.5.2 Fatores que influenciam na formação e dissolução da colagem	55
3.5.2.1 Características químicas, físicas e mineralógicas do cru.....	57
3.5.2.1.1 Módulos de controle da mistura crua	58
3.5.2.1.2 Outros fatores relacionados ao cru	61
3.5.2.2 Os Combustíveis	61
3.5.2.2.1 Carvão Mineral	64
3.5.2.2.2 Carvão Vegetal	65

3.5.2.2.3 Coque de petróleo	66
3.5.2.2.4 O Óleo combustível	68
3.5.2.2.5 Os Combustíveis alternativos	70
3.5.2.3 A chama	72
3.5.2.3.1 Os aspectos da chama	74
3.5.2.4 O revestimento refratário	80
3.5.2.5 As condições operacionais	84
3.5.3 Os anéis e a formação de colagens na caixa de fumaça	88
3.5.3.1 Anéis de boca	88
3.5.3.2 Anéis de clínquer	89
3.5.3.3 Anéis de sulfato	89
3.5.3.4 A colagem na torre de ciclones (caixa de fumaça)	90
4 METODOLOGIA	94
4.1 Contextualização da empresa	94
4.2 Conceito de pesquisa	96
4.3 Pesquisa bibliográfica	96
4.4 Pesquisa documental	96
4.5 Pesquisa participante	97
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	98
5.1 Monitoramento da colagem no forno rotativo	98
5.2 A dissolução da Colagem	101
5.3 Ações tomadas	105
5.4 Tratamento da formação de colagem na caixa de fumaça	112
5.5 Confiabilidade nas análises químicas e físicas	115
5.6 Monitoramento de atmosfera redutora	116
6 SUGESTÕES E MELHORIAS	118
7 CONCLUSÃO	120
REFERÊNCIAS	121
ANEXO A - Definições	126

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01: Etapas de fabricação do cimento	28
FIGURA 02: Processo de extração de calcário	29
FIGURA 03: Sistema de dosificação e pré-homogeneização	31
FIGURA 04: Classe de resíduos	35
FIGURA 05: Forno via seco com delimitações por zonas os quais define as etapas de reações que acontecem durante o processo de queima	40
FIGURA 06: Forno rotativo via seco para produção de clínquer	46
FIGURA 07: Interior do forno rotativo	47
FIGURA 08: Esquema de forno rotativo com pré-calcinador em linha	47
FIGURA 09: Sistema de Arrefecimento de grelhas	48
FIGURA 10: Representação moinho tubular de bolas, sendo uma foto externa, um desenho com um corte demonstrando a parte interna do moinho.....	49
FIGURA 11: Fluxograma do sistema de moagem	50
FIGURA 12: Esquema da formação de colagem e o fluxo de perda de calor através da parede do forno.....	52
FIGURA 13: Formação da colagem na zona de queima do forno de clínquer	54
FIGURA 14: Formação de colagem no interior do forno.....	54
FIGURA 15: Ciclo clássico de formação de colagem no forno rotativo de clínquer.....	56
FIGURA 16: Tipos de combustíveis utilizados atualmente pela indústria cimenteira	63
FIGURA 17a: Local onde é injetado o combustível alternativo.	
FIGURA 17b: Sistema de correia transportadora e válvulas clappets para injeção de Resíduo triturado no forno.....	71
FIGURA 18: Representação esquemática da saída do forno e a chama	73
FIGURA 19: Ponta do maçarico com circuitos de ar e combustível	77
FIGURA 20: Representação de um corte transversal do forno	78
FIGURA 21: Ponta do Maçarico com direcionamento de ar para composição do formato da chama.....	79
FIGURA 22: Mapeamento do forno com perfil de refratários.....	82
FIGURA 23: Representação do estado do forno – forno frio, normal e quente	85

FIGURA 24: Representação gráfica da volatilização em função de atmosfera reductora/ oxidante e da temperatura.....	93
FIGURA 25: Esquema da volatilização – Ciclo dos voláteis.....	93
FIGURA 26: Representação gráfica da temperatura da carcaça do forno registrada pelo monitoramento do Scanner às 04h00min.....	99
FIGURA 27: Representação gráfica da temperatura da carcaça do forno registrada pelo monitoramento do Scanner às 22h00min.....	100
FIGURA 28: Forno rotativo – em destaque a base de rolamento (aliança). ..	101
FIGURA 29: Representação gráfica de resultados analíticos da farinha.	102
FIGURA 30: Representação gráfica de resultados analíticos de NOx	103
FIGURA 31: Representação gráfica das variáveis de processo.	104
FIGURA 32: Ventiladores instalados	106
FIGURA 33: Representação gráfica da temperatura da carcaça do forno registrada pelo monitoramento do Scanner antes da formação de colagem.	107
FIGURA 34: Representação gráfica da temperatura da carcaça do forno registrada pelo monitoramento do Scanner após a formação de colagem....	107
FIGURA 35: Representação gráfica da temperatura da carcaça do forno registrada pelo monitoramento do Scanner dia 06/05/2009 às 20h30min.....	108
FIGURA 36: Representação gráfica da temperatura da carcaça do forno registrada pelo monitoramento do scanner às 10h30min do dia 06/05/2009.	109
FIGURA 37: Representação gráfica das variáveis de processo.	110
FIGURA 38: Representação gráfica da temperatura da carcaça do forno registrada pelo monitoramento do Scanner 12 horas após o superaquecimento..	111
FIGURA 39: Representação gráfica das variáveis de processo mostrando a instabilidade do forno no momento da intervenção para limpeza da caixa de fumaça.....	112
FIGURA 40: Colaborador executando limpeza na caixa de fumaça com bomba hidráulica de alta pressão.	113
FIGURA 41: Canhão de ar comprimido	113
FIGURA 42: Representação gráfica de resultados analíticos (% de SO ₃ e Cl) do produto em processo.	114
FIGURA 43: Tela do <i>status</i> da injeção de resíduos.....	116
FIGURA 44: Representação gráfica das variáveis de processo.	117

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: Representação em percentual das empresas produtoras de cimento no mercado nacional	95
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 01: Nomenclatura do cimento Portland.....	22
TABELA 02: Composição dos principais de cimento produzidos no Brasil	26
TABELA 03: Principais etapas de reações de formação do clínquer e respectivos processos de troca de calor.....	39
TABELA 04: Componentes das cinzas de amostras de carvão mineral.....	63
TABELA 05: Composição típica do carvão mineral utilizados na indústria cimenteira	64
TABELA 06: Composição química do carvão vegetal, sendo duas amostras com resultados de teor demonstrados em % em massa.....	66
TABELA 07: Composição típica do coque verde de petróleo	66
TABELA 08: Composição típica do óleo combustível.....	69
TABELA 09: Composição típica de resíduos.....	72
TABELA 10: Relação entre cor e temperatura da chama.....	79
TABELA 11: Tipos e características básicas dos tijolos refratários	81
TABELA 12: Reações químicas com presença de enxofre	90
TABELA 13: Ajustes no equipamento – Obtenção de chama ideal.....	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica
AW – Fator de colagem
CEMBUREAU – The European Cement Association
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
CPRH - Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
EPI – Equipamentos de Proteção Individual
FSC – Fator de saturação de cal
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia e Qualidade
HTS – Alto teor de enxofre.
NBR – Norma Brasileira de Regulamentação
MA – Módulo de alumina
MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia
MPa – Mega pascal
MS – Módulo de silicato
PCE – Plano de Controle Emergencial
QMC – Gerenciamento do controle da qualidade
SNIC – Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento.
Kcal/kg – kilocaloria por quilograma
kWh/kg – kilowatt hora por quilograma
RPM – Rotação por minuto (velocidade motriz)
TBTS – Teor de enxofre muito baixo.

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade, pode-se citar que uma das necessidades básicas do ser humano é ter um local seguro para abrigar a si próprio e sua família. Com isso ter uma casa passou a ser uma prioridade. Prioridade esta, passou a ser mais intensa e foi assimilada quando o homem deixou de ser nômade. Sendo assim, a necessidade de moradia em conjunto ao êxodo rural, propiciaram a criação de grandes centros urbanos e começaram a surgir os grandes parques industriais. Tais fatores foram preponderantes para que fosse possível o desenvolvimento da produção do Cimento, que desde sua invenção é um dos itens mais utilizados pelo ser humano e de extrema importância para o desenvolvimento da sociedade.

O processo histórico do desenvolvimento industrial dinamizou as formas de trabalho, proporcionando a este fenômeno o que ficou conhecido como Revolução Industrial, ocorrida na Inglaterra há mais de dois séculos.

O alto nível de desenvolvimento da sociedade e dos processos produtivos disseminou no mundo o processo histórico do capitalismo, consolidou o progresso, estimulou o consumo e a produção em grande escala. A sociedade passou a ser mais exigente e a buscar a realização de suas necessidades.

As inovações tecnológicas, as informatizações e a automação dos processos, levaram a um encurtamento das distâncias e fizeram com que as informações fossem disseminadas em tempo cada vez menor. Com isso, os processos produtivos e simultaneamente as sociedades, se desenvolveram atingindo níveis inéditos.

A produção do Cimento Portland é também um segmento de mercado que se desenvolveu rapidamente, onde para suprir a demanda do mercado cimenteiro, grandes grupos de fabricantes de cimento foram criados no mundo e os já existentes fizeram grandes investimentos no aumento da produtividade, visando acompanhar o crescimento econômico e suprir as necessidades de infra-estrutura de uma população de bilhões de pessoas.

Atualmente indústrias no geral inclusive a do ramo Cimenteira buscam alternativas para atender as necessidades da demanda mundial com produtos de altíssima qualidade e em contrapartida são submetidas a desafios como, por

exemplo, produzir com recursos naturais cada vez mais escassos e garantir um desenvolvimento sustentável sem comprometer as gerações futuras.

Com isso a garantia de processos produtivos eficazes deve se buscada a todo tempo com a implementação de métodos gerenciais responsáveis, proporcionando empresas competitivas.

O presente trabalho visa contribuir com o setor através de um estudo focado em analisar a formação de colagem nos processos produtivos da indústria cimenteira, objetivando que este seja fonte de pesquisa e conhecimento dos mecanismos de formação e dissolução de colagens, fonte de investigação e caracterização das colagens, a fim de contribuir estrategicamente com métodos e critérios para atuar positivamente nos processos, visando a segurança dos colaboradores e dos equipamentos, a redução de custos operacionais e qualidade dos produtos, considerando que o preço e a qualidade dos produtos disponibilizados, são aspectos de desempenho e de fundamental importância para empresa sobreviver no mercado competitivo.

1.1 PROBLEMA

O processo de fabricação de clínquer¹ é caracterizado por reações físico-químicas entre as matérias-primas que acontecem a altas temperaturas, e é destas reações que advém à formação da colagem.

Segundo Peray (1986, p. 147), “Colagem é a massa de clínquer ou de partículas de pó que se aderem à parede do forno, tendo partido de um estado líquido ou semilíquido (viscoso), para o estado solidificado”. Sua formação nas paredes das instalações do forno rotativo caracteriza um cenário de aspectos desejáveis e indesejáveis ao processo, porém a não formação de colagem também é considerada um aspecto indesejável ao processo, pois o forno possui uma camada de elementos refratários, que depende do mecanismo de formação de colagem para maior durabilidade e eficácia.

Outro tipo de colagem que é estabelecido pelo processo, é a que adere à parede da câmara de entrada do forno. Estas são originadas pelo balanço desfavorável do teor de enxofre e álcalis inseridos no processo.

Sendo o objeto de estudo inserido num meio produtivo constituído de várias etapas de processo, como assegurar um processo de produção estável com uma produtividade contínua, ou seja, produzir mais com menos recursos, garantindo a segurança dos colaboradores e equipamentos, objetivando produtos de qualidade a custos cada vez menores tornando a empresa sólida e competitiva?

¹ Clínquer é o componente base para fabricação de cimento.

1.2 Justificativa

A motivação que levou ao desenvolvimento deste trabalho de pesquisa foi o fato de o pesquisador estar inserido diariamente na indústria cimenteira, tendo como função executar intervenções no processo de produção de cimento com operações e inspeções em equipamentos, controle de qualidade do produto durante as etapas de fabricação, dentre outros.

Em meio a este contexto, observa-se que o processo da indústria cimenteira é constituído de intempéries, de uma vasta quantidade de variáveis a serem controladas, de cuidados que devem ser tomados para que não haja danos aos equipamentos, de uma grande preocupação com a segurança dos colaboradores que muitas das vezes fazem intervenções nos equipamentos estando eles em operação, isto devido à formação indesejada das colagens, dentre outras.

Mediante a estes fatores, justifica-se o interesse de estudar o processo de produção e o mecanismo da formação de colagem, com intuito conhecer e identificar os critérios que permitam a otimização do processo produtivo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar os mecanismos da formação e dissolução da colagem no processo de fabricação da indústria cimenteira.

2.2 Objetivos específicos

- Descrever de maneira sucinta processo produtivo da indústria cimenteira;
- Analisar a formação e dissolução de colagem na zona de clínquerização e a formação da colagem na caixa de fumaça na entrada do forno;
- Disponibilizar este trabalho como ferramenta de estudo para conhecimento do processo da formação de colagem;
- Analisar os critérios que permitem um processo produtivo estável tais como: (Matéria-prima, combustíveis, equipamentos, variáveis de processo).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A História do Cimento Portland

Conforme ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - (2002), o cimento é um pó fino com propriedades aglomerante, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. Depois de endurecido mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o cimento Portland não se decompõe mais.

Segundo Battagin, (2006), a palavra Cimento tem origem do latim *Caementu* que era um tipo de pedra natural de rochedos, não esquadrejada muito usada na Roma antiga. Há cerca de 4.500 anos, os imponentes monumentos do Egito antigo já utilizavam uma liga constituída por gesso calcinado. As grandes obras gregas e romanas, como o Panteão e o Coliseu, foram construídas com material extraído de solos de origem vulcânica da ilha grega de Santorino ou das proximidades da cidade italiana de Pozzuoli, tais materiais possuíam propriedades de endurecimento sob a ação da água.

Conforme o autor supracitado, o grande passo para o 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.

Segundo ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - (2002), em 1824 o construtor inglês Joseph Aspdin calcinou a mistura de pedras calcárias e argila, nas suas experiências ele obteve uma mistura que após secar se tornava tão dura quanto às pedras usadas em construções na Inglaterra. O resultado da invenção se assemelhou em cor e na dureza às pedras da Ilha britânica de Portland, o material obtido não se dissolvia em água e foi patenteado pelo construtor no mesmo ano com o nome de Cimento Portland.

Conforme Battagin (2006), no Brasil a produção de cimento veio a ser implementada em 1924, com a construção da Companhia Brasileira de Cimento Portland, fábrica em Perus estado de São Paulo e historicamente pode ser considerada como o marco da implantação da indústria brasileira de cimento. As primeiras toneladas produzidas foram colocadas no mercado do país em 1926,

mercado que até então dependia exclusivamente do produto importado. A produção nacional foi gradativamente elevada com a implantação de novas fábricas e a participação de produtos importados oscilou durante as décadas seguintes, até praticamente desaparecer nos dias de hoje.

Atualmente a indústria de Cimento Portland tem se desenvolvido a cada dia, os seus produtos são rigorosamente definidos e sua fabricação segue princípios bem estabelecidos. A grande versatilidade de emprego do cimento e a criação de novos produtos com níveis de qualidade notáveis fazem com que a indústria cimenteira seja sólida e tecnologicamente adaptada as exigências do mercado.

3.2 Características e propriedades do cimento

Para conhecer as características e as propriedades dos diversos tipos de cimento Portland é necessário estudar suas composições.

Segundo ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - (2002), o cimento Portland é composto de clínquer e de adições, sendo o clínquer o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland. São as adições que definem as propriedades dos cimentos, com isto, podem variar de um tipo de cimento para o outro.

O autor supracitado diz que os diferentes tipos de cimento produzidos no país são regidos por normas e são caracterizados principalmente em função de sua composição. Os principais tipos oferecidos no mercado e os mais empregados são citados na TAB. 2 p. 26, descrevendo ainda o percentual de composição de adição para cada tipo apresentado e suas respectivas normas designadas pela Associação Brasileira Normas Técnicas – ABNT, através das NBRs.

Os vários tipos de cimento normalizados são designados pela sigla e pela classe de resistência. Segundo ABCP (2002), as siglas correspondem ao prefixo CP acrescido dos algarismos romanos de I a V, conforme o tipo do cimento, sendo as classes indicadas pelos números 25, 32 e 40. As classes são valores mínimos da resistência à compressão garantida pelo fabricante, após 28 dias de cura.

- Tipo de cimento - CPII-E32
- Sigla CP – corresponde a Cimento Portland;
- Algarismo II - equivale ao tipo do cimento;
- Letra E – significa que o cimento é composto por Escória;

- Número 32 - Equivale à resistência à compressão mínima alcançada aos 28 dias de cura - após a utilização - no caso 32 MPa.

A TAB. 1 apresenta a nomenclatura atual com códigos dos diferentes tipos de cimento Portland. As normas técnicas da ABNT referentes aos tipos apresentados nesta 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.

TABELA 1 – Nomenclatura do cimento Portland.

Nome técnico		Sigla	Classe	Identificação do tipo e classe
Cimento portland comum (NBR 5732)	Cimento portland comum	CP I	25 32 40	CP I-25 CP I-32 CP I-40
	Cimento portland comum com adição	CP I-S	25 32 40	CP I-S-25 CP I-S-32 CP I-S-40
Cimento portland composto (NBR 11578)	Cimento portland composto com escória	CP II-E	25 32 40	CP II-E-25 CP II-E-32 CP II-E-40
	Cimento portland composto com pozolana	CP II-Z	25 32 40	CP II-Z-25 CP II-Z-32 CP II-Z-40
	Cimento portland composto com filler	CP II-F	25 32 40	CP II-F-25 CP II-F-32 CP II-F-40
Cimento portland de alto-forno (NBR 5735)		CP III	25 32 40	CP III-25 CP III-32 CP III-40
Cimento portland pozolânico (NBR 5736)		CP IV	25 32	CP IV-25 CP IV-32
Cimento portland de alta resistência inicial (NBR 5733)		CP V-ARI	-	CP V-ARI
Cimento portland resistente aos sulfatos (NBR 5737)		-	25 32 40	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS. Exemplo: CP I-32RS, CP II-F-32RS, CP III-40RS etc.
Cimento portland de baixo calor de hidratação (NBR 13116)		-	25 32 40	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC. Exemplo: CP I-32BC, CP II-F-32BC, CP III-40BC etc.
Cimento portland branco (NBR 12989)	Cimento portland branco estrutural	CPB	25 32 40	CPB-25 CPB-32 CPB-40
	Cimento portland branco não estrutural	CPB	-	CPB
Cimento para poços petrolíferos (NBR 9831)		CPP	G	CPP - classe G

FONTE: ABCP (2002).

3.2.1 Composição

Conforme citado pela ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - (2002), o cimento Portland é composto de clínquer e de adições, sendo o clínquer o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland. São as adições que definem as propriedades dos cimentos, com isto, podem variar de um tipo de cimento para o outro.

3.2.1.1 O clínquer

“O clínquer tem como matérias-primas o calcário e a argila, ambos obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento. A rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada, em proporções adequadas, com argila moída. A mistura formada atravessa então um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450°C. O intenso calor transforma a mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno o clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó”. (ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - 2002, p.6)

De acordo com Cárpio (2005), o clínquer componente base do cimento Portland, obtido a partir da moagem, homogeneização e posterior queima, em alta temperatura ($\pm 1450^{\circ}\text{C}$), no interior de um forno rotativo, a partir de uma mistura pulverizada, denominada cru ou farinha, proveniente da matéria-prima composta de: Calcário, argila, areia, minério de ferro, etc. Os principais elementos químicos que constituem o clínquer são a cal (CaO) e a Sílica (SiO_2) que reagem entre si formando Silicatos de Cálcio, os quais são os principais componentes ativos do cimento.

3.2.1.2 As Adições

Segundo ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - (1999, p.8), “as adições são outras matérias-primas que, misturadas ao clínquer na fase de moagem, permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland hoje disponíveis no mercado”.

As adições no geral são usadas para controle da qualidade, outras dão características relevantes ao cimento e outras por terem particularidades como elementos químicos semelhantes aos do clínquer, são usadas na redução de custos operacionais e acabam por conferir ao cimento pelo menos uma qualidade a mais. As matérias-primas são o gesso, escórias de alto forno, materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos.

Adição de Gesso

“A adição de gesso ao clínquer tem a finalidade de controlar o tempo de endurecimento ou a pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer quando este é misturado com água. Por isso o gesso é uma adição presente em todos os tipos de cimento Portland. A quantidade adicionada é pequena, em geral 3% de gesso para o total de clínquer em massa”. (DUDA W.H., 1977, *apud* CÁRPIO, 2005, p.10)².

“O gesso tem como função básica controlar o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído quando este é misturado com água. Caso não se adicionasse o gesso à moagem do clínquer, o cimento, quando entrasse em contato com a água, endureceria quase que instantaneamente, o que inviabilizaria seu uso nas obras. Por isso, o gesso é uma adição presente em todos os tipos de cimento Portland. A quantidade adicionada é pequena: em geral, 3% de gesso para 97% de clínquer, em massa”. (ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - 2002, p. 6 e 7).

Adição de Escória

De acordo com ArcelorMittal, (2009), a escória utilizada como adição na produção de cimento tem origem durante a fabricação de ferro gusa, nas quais se reduzem os óxidos contidos nos minerais de ferro e se separam as impurezas que os acompanham. As escórias se formam pela fusão das impurezas do minério de ferro, juntamente com a adição de fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque, que, por sua insolubilidade e menor densidade, sobrenada no ferro gusa e é conduzida por canais, até o lugar de resfriamento.

² Duda, W.H.(1997). **Manual Tecnológico del cimento**. Editores Técnicos Associados Barcelona – Espanha.

A escória líquida é transportada para os granuladores, onde é resfriada bruscamente por meio de jatos de água sob alta pressão. Não havendo tempo suficiente para formação de cristais, essa escória se granula "vitrificando" e recebe o nome de Escória Granulada de Alto Forno e devido ao seu grande potencial hidráulico (endurecer, depois de moída, quando em contato com a água), tem um mercado amplo, sendo consumida na produção de cimento.

Conforme ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - (2002), as Escórias são subprodutos das indústrias siderúrgicas, obtidas durante a produção de ferro-gusa. As escórias são semelhantes a grãos de areia, dentre suas características, elas possuem propriedades de ligante hidráulico muito resistente, ou seja, que reagem em presença de água, desenvolvendo características aglomerantes de forma semelhante à do clínquer. Sua adição desde que em proporções corretas, podem contribuir para que o cimento apresente melhorias em algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final.

Adição de materiais pozolânicos

Segundo ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - (2002), materiais pozolânicos podem ser de origem natural, como as rochas vulcânicas, outras são obtidas artificialmente, como as cinzas volantes derivadas da queima do carvão mineral em usinas termelétricas. Estes materiais quando pulverizados, forem colocados em presença de outro material, no caso o clínquer que em presença de água, reage liberando hidróxido de cálcio, desta mistura obtêm-se uma interação química, passando o sistema a apresentar propriedades de ligante hidráulico. A adição de materiais pozolânicos ao clínquer e moídos juntamente com gesso é viável desde que dentro dos limites especificados, podendo conferir ao cimento maior impermeabilidade.

Adição de materiais carbonáticos

De acordo com ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - (2002), materiais carbonáticos são rochas moídas tendo em sua constituição o carbonato de cálcio. Sua adição no cimento confere ao concreto e a argamassa, maior trabalhabilidade durante o manuseio, isto porque, os grãos destes materiais

possuem dimensões adequadas para se alojar entre os grãos dos demais componentes do cimento.

As determinações das quantidades das matérias-primas que vão constituir os diversos tipos de cimento Portland, são determinadas pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, que no país é o órgão responsável para estabelecer padrões de referência para as adições.

TABELA 2 - Composição dos principais tipos de cimento produzidos no Brasil

TIPOS	Sigla	Composição em massa (%)				Normas Técnicas
		Clinker + Gesso	Escória Alto-Forno	Material Pozolâmico	Material Carbonático	
Cimento Portland Comum	CPI	100	-	-	-	NBR 5732
	CPI-S	95 - 99	1 - 5	1 - 5	1 - 5	
Cimento Portland Composto	CPH-E	56 - 94	6 - 34	-	0 - 10	NBR 11578
	CPH-Z	76 - 94	-	6 - 14	0 - 10	
	CPH-F	90 - 94	-	-	6 - 10	
Cimento Portland de Alto-Forno	CPH	25 - 65	35 - 70	-	0 - 5	NBR 5735
Cimento Portland Pozolâmico	CPV	45 - 85	-	15 - 50	0 - 5	NBR 5736
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	CPV-ARI	95 - 100	-	-	0 - 5	NBR 5733
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial e Resistente aos Sulfatos	CPV-ARI-RS	95 - 100	-	-	0 - 5	NBR 5737

FONTE: ABCP (2002) adaptada.

3.3 A qualidade do cimento

De acordo com ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - (2002), as normas técnicas usadas para determinar as características e as propriedades mínimas de qualidade do cimento Portland, é preparada e divulgada pela ABNT, ficando a cargo da ABCP a aferição da qualidade, baseados nos princípios do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO.

“As normas técnicas definem não somente as características e propriedades mínimas que os cimentos Portland devem apresentar como, também, os métodos de ensaio empregados para verificar se esses cimentos atendem às exigências das respectivas normas”. (ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - 2002, p. 8).

Várias fábricas no Brasil possuem um sistema de controle de qualidade baseados nas normas brasileiras e as características controladas são:

- Resistência à compressão;
- Granulometria ou finura;
- Tempo de pega;
- Falsa pega;
- Perda ao fogo;
- Expansibilidade;
- Calor de hidratação;
- Oxido de magnésio;
- Tonalidade do cimento.

3.4 Processo de Fabricação do cimento Portland.

Composto por etapas distintas de processo, sendo que da extração da matéria-prima até a obtenção do produto final, compõe-se uma cadeia produtiva, onde cada equipamento deve funcionar com produtividade contínua, isto por alguns equipamentos serem fornecedores uns dos outros constituindo um circuito fechado de produção.

As etapas de processo dispostas no fluxograma da (FIG. 1) ilustra todo o processo de fabricação do cimento Portland que serão detalhadas a seguir:

- Mineração, extração e britagem das matérias-primas: Calcário calcítico, dolomítico e argilas (1, 2, 3 e 4);
- Dosificação e pré-homogeneização das matérias-primas, com a aplicação de alguns aditivos corretivos como bauxita, minério de ferro, e outros (5);
- Moagem das matérias-primas e homogeneização do material moído, que a partir desta etapa é denominado de cru ou farinha (6 e 7);
- Preparação dos combustíveis (8);
- Queima da mistura obtida (cru ou farinha) no interior de um forno em alta temperatura (9);
- Resfriamento e britagem do clínquer (10);
- Estocagem do clínquer (11);
- Adição e mistura de aditivos para cimento (12);

- Moagem do cimento (13);
- Transporte do cimento moído (14);
- Estocagem e expedição do cimento acabado (15).

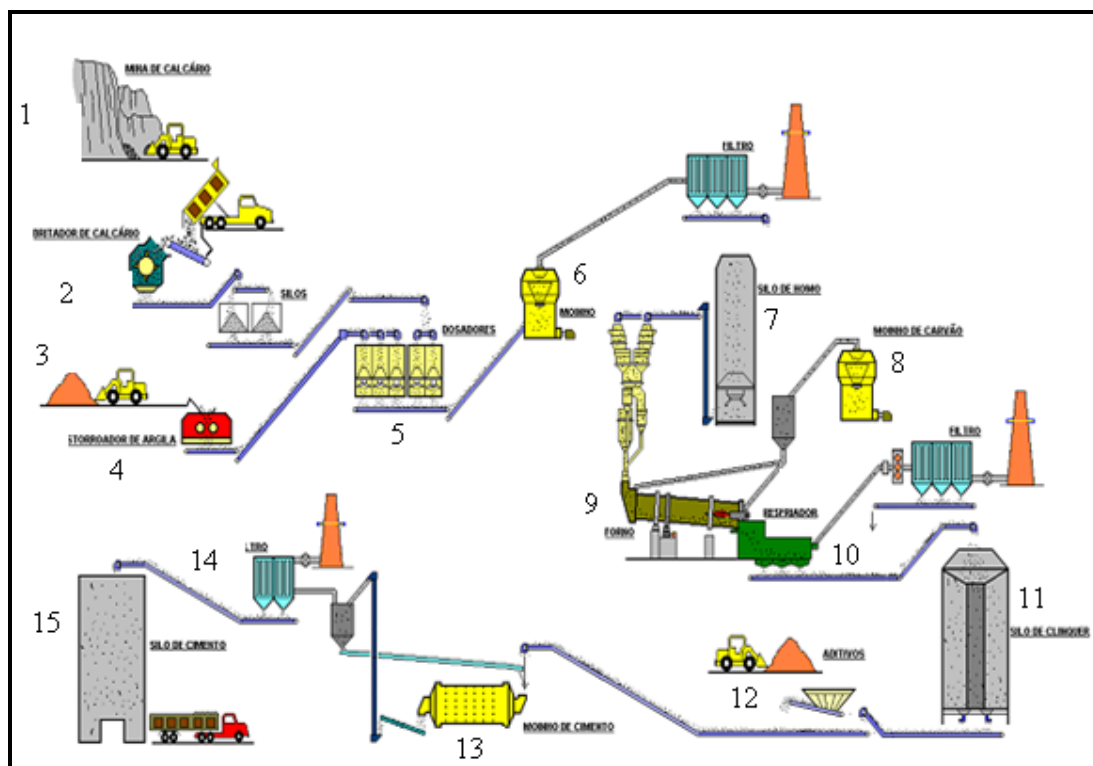


FIGURA 1 – Etapas da fabricação do cimento

FONTE: Lafarge Brasil, (2005).

3.4.1 A mineração ou extração

De acordo com Ferreira (2000), Mineração é um termo que abrange os processos, atividades e indústrias, cujo objectivo é a extração de substâncias minerais a partir de depósitos ou massas minerais.

O processo de extração de minerais ou matérias-primas naturais consideradas primárias, tais como: calcário calcítico, dolomítico e argila, é feito de jazidas ou minas que, na maioria dos casos são localizadas nas proximidades da fábrica viabilizado as questões operacionais e de custos de produção.

Esta etapa do processo é de fundamental importância para o processo de fabricação do clínquer, pois nela é iniciado todo o processo de verificação das composições físicas e químicas das matérias-primas, com o um processo analítico

do material em pontos a serem explorados. Após conhecer as composições, é feito um mapeamento geológico e um planejamento da lavra, viabilizando a exploração respeitando as questões ambientais, econômicas e o contexto da qualidade, pois uniformidade da composição da matéria-prima que será utilizada no processo seguinte é um fator preponderante para a qualidade do processo com um todo. .

Após a extração, essas matérias-primas são reduzidas de tamanho por britadores na própria pedreira e transportadas para a fábrica, para estocagem intermediária, homogeneização e posterior preparação.

De acordo com documento Lafarge Brasil (1998), as matérias-primas utilizadas na fabricação de cimento devem conter carbonato de cálcio (CaCO_3), sílica - dióxido de silício - (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e trióxido de ferro (Fe_2O_3), pois esses elementos químicos combinados produzem compostos hidraulicamente ativos no cimento. Também são encontrados em quantidades menores de outros constituintes, como carbonato de magnésio, óxido de potássio, óxido de sódio, enxofre, etc. A (FIG. 2) ilustra as etapas do processo de mineração de calcário bem como o transporte do calcário britado por correias transportadoras.



FIGURA 2 - Processo de extração de calcário.

FONTE: Lafarge Brasil (2005)

Conforme documento Lafarge Brasil (1998), as argilas são compostas por silicatos de metais alcalinos como sódio e potássio, e de alcalinos terrosos como cálcio e magnésio em particular os feldspatos e micas. A composição principal das argilas é formada por hidro-silicatos de alumínio e ferro.

A extração da argila também passa por um processo semelhante ao do calcário, depois de conhecer a composição físico-química da argila, com um projeto de pesquisa feito através de sondagem para extração de amostras e análises qualitativas em laboratório a fim de mapear e planejar a exploração. Conhecida a composição físico-química da argila, a extração começa pelo desmonte que é feito por máquinas, em seguida o material é transportado até o destorroador onde acontece a redução do tamanho dos grãos e em fim a argila preparada é transportada por correias transportadoras para baías de armazenagem.

A matéria-prima “corretiva” usada na indústria cimenteira tem com função, suprir o processo de elementos que não se encontram disponíveis nas matérias-primas principais, como exemplo, a areia complementando a deficiência no teor de Sílica, a bauxita utilizada para suprir deficiência de Alumina, e etc.

Como citado por Salomon (2002), materiais “corretivos”, tais como: A bauxita, o minério de ferro e a sílica, podem ser necessários para adequar a composição química da mistura, de acordo com as necessidades do processo e com as especificações do produto. A quantidade desses materiais corretivos é pequena, comparada com o enorme fluxo de massa das matérias-primas principais.

Outra característica que vem sendo aplicada pela indústria cimenteira e demonstra um alinhamento aos princípios do Desenvolvimento Sustentável, possuindo também uma vasta gama de vantagens, é a utilização de resíduos industriais não energéticos como substituição de parte da matéria-prima, com ressalva que seus componentes tenham características minerais necessárias para produção do clínquer.

“Matérias-primas secundárias (ou alternativas) originadas de fontes industriais são usadas como substitutos das matérias-primas principais e corretivas, em uma quantidade limitada. Da mesma maneira que as matérias-primas tradicionais, elas podem ser adicionadas ao britador da pedreira ou, mais

comumente, diretamente no sistema de preparo das matérias-primas, na fábrica de cimento” (CEMBUREAU, 1999, *apud* SALOMON, 2002, p.25)³.

3.4.2 Dosificação e pré-homogeneização

Após a extração e britagem, as matérias primas são encaminhadas para estocagem intermediária. Durante o processo de extração a qualidade química e física da matéria-prima foi conhecida. A próxima etapa de processo é a dosificação e pré-homogeneização das matérias-primas conforme ilustra a (FIG. 3).

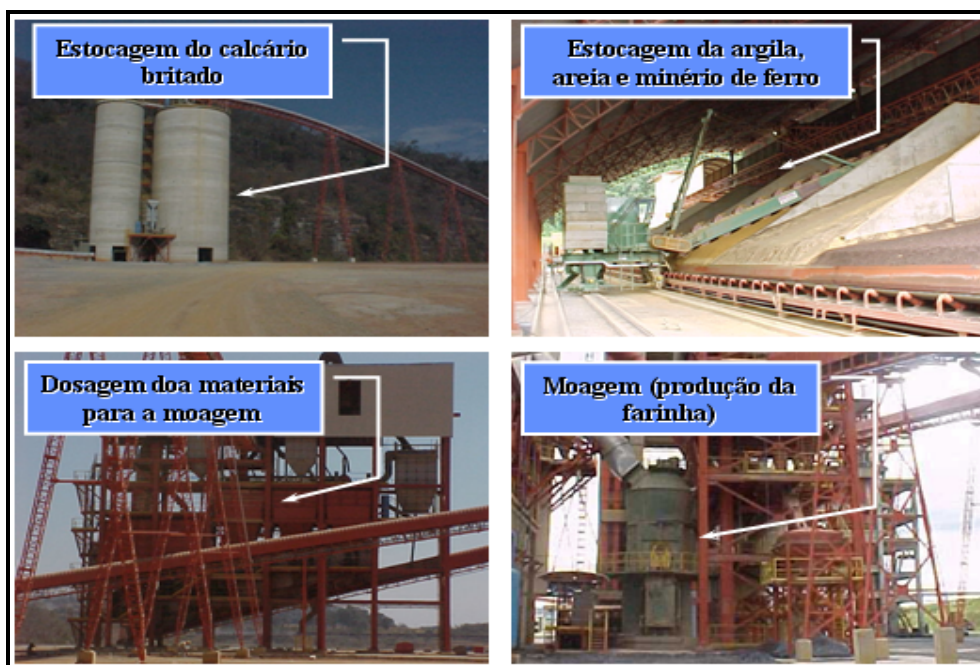


FIGURA 3 - Sistema de dosificação e pré-homogeneização.

FONTE: Lafarge Brasil (1998).

Conforme documento Lafarge Brasil (1998), a determinação da porcentagem de cada matéria-prima depende essencialmente da composição que se deseja para o clínquer. Na composição da mistura, vários métodos podem ser utilizados para determinar a porcentagem de argila, calcário e corretivo que deve compor a mistura crua.

³ Cembureau – The European Cement Association – “Best Available Technique For The Cement Industry”, 1999. On-Line. Disponível em: <http://www.cembureau.be>. Acesso em 03/09/2002.

O processo de dosificação é de extrema importância para as etapas seguintes, pois as reações que acontecerão para formação do clínquer dependem em grande parte de uma dosagem correta das matérias-primas. O controle desta etapa contribui diretamente com a qualidade do produto final e está extremamente relacionado com o processo estudado, que é a formação de colagem, no qual detalharemos em próximos tópicos.

A etapa do processo dosificação, é feita através de um sistema automatizado de balanças dosadoras, que no caso da Lafarge, são controladas por um programa de software chamado QMC (gerenciamento do controle da qualidade), onde são armazenados dados referentes a resultados analíticos obtidos durante a extração e/ou recebimento das matérias-primas. Com base em parâmetros especificados de qualidade, o software faz os cálculos estatísticos e automaticamente envia sinal para o sistema, determinando a quantidade em percentual de cada matéria-prima que irá compor o cru, finalizando a etapa de dosificação e pré-homogeneização.

3.4.3 Moagem e homogeneização da matéria-prima dosada

O material dosado durante o processo de dosificação é conduzido para etapa seguinte que é composta por um sistema de moagem, que tem a função de reduzir o tamanho das matérias-primas, propiciando uma granulometria suficientemente fina e uma mistura homogênea dos componentes, características determinantes para a qualidade do clínquer.

Conforme treinamento ministrado na Lafarge Brasil (1998), o sistema de moagem de cru é composto de moinho do tipo vertical de rolos, onde o princípio de redução das partículas ocorre quando a camada de material é exposta à alta pressão entre duas superfícies duras, no caso os rolos e a mesa do moinho. O material fino é arrastado pela depressão do sistema, passando por um separador que faz a seleção das partículas, sendo que, as partículas na granulometria suficientemente fina vão para próxima etapa do processo e as grossas retornam para o processo de moagem.

Conforme documento Lafarge Brasil (1998), a velocidade de reação depende muito das dimensões dos grãos, devendo durante a moagem, reduzir a dimensão máxima dos grãos assim como a quantidade de grãos retidos em peneira

malha 170 mesh. Em contrapartida, a fração mais fina deve ser mantida ao mínimo, para reduzir o circuito de poeira prejudicial ao processo de clínquerização e às instalações. Em resumo a farinha deve dispor de uma granulometria bastante uniforme e suficientemente fina.

Ainda conforme documento supracitado, no processo de produção do clínquer composto por forno rotativo não existe um sistema de homogeneização interna, com isso a homogeneidade da farinha antes da alimentação deve ser eficiente evitando a segregação dos componentes do cru. As conseqüências principais de uma segregação de componentes é a produção de clínquer fino concomitantemente com clínquer bem granulado, sendo diferentes os módulos químicos dos dois tipos de clínquer, fato que é prejudicial à qualidade do produto final e impactando também na formação de colagem no forno e estudaremos nos próximos capítulos.

Estudos da ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - (1984) relatam que a mistura crua devidamente dosada e com finura adequada, de ter a sua homogeneização assegurada para permitir, na clínquerização, uma perfeita combinação dos elementos formadores dos componentes de clínquer.

De acordo com ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - (1984), são necessários aproximadamente 1,55 kg de farinha (cru) para produzir 1 kg de clínquer.

3.4.4 Preparação dos combustíveis

“Os combustíveis convencionais (fósseis) usados no processo de fabricação do clínquer, são principalmente, o carvão, o coque de petróleo e os óleos pesados. O preparo destes combustíveis passa por um processo de moagem, secagem, homogeneização e estocagem, para depois alimentar o forno de clínquer”. (CEMBUREAU, 1999, *apud* CÁRPIO, 2005, p.20)⁴.

De acordo com Lafarge Brasil, Cecil (2003), a escolha do combustível para produção do clínquer é sempre uma combinação das seguintes características: Complexidade e custos dos equipamentos, custo do Kcal/kg de clínquer,

⁴ Cembureau – The European Cement Association – “Best Available Technique For The Cement Industry”, 1999. On-Line. Disponível em: <http://www.cembureau.be>. Acesso em 05 maio de 2003.

perturbações causadas pelo combustível durante o processo de cozimento e alterações da qualidade do clínquer.

Para que as reações de formação do clínquer aconteçam é necessário haja uma fonte de energia térmica que será capaz de aquecer a altas temperaturas o sistema. Esta fonte de energia é proveniente da combustão.

Segundo Alsop (2005), combustão é especificamente um grupo de reações químicas exotérmicas que acontecem entre o combustível e o oxigênio conduzido pelo comburente, envolvendo altas temperaturas.

Atualmente a indústria cimenteira se utiliza do co-processamento de resíduos que por definição, é uma técnica de destruição térmica, a altas temperaturas, de resíduos industriais, devidamente licenciados, em fornos de clínquer. Esta queima é feita com utilização de aproveitamento do conteúdo energético e/ou da fração mineral; como matéria prima. Com importância altamente relevante, esta prática é sem a geração de novos resíduos, sendo esta definição ministrada em treinamento na Lafarge Brasil (2004).

Co-processamento é a extinção dos resíduos industriais gerados de um processo produtivo que, dependendo de suas características, será utilizado como substituição energética e/ou substituição de matéria-prima no processo da produção clínquer na fabricação de cimento, conforme a Resolução 264 (CONAMA, 1999).

De acordo com ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - (2004), para a classificação de resíduos sólidos, é importante conhecer os constituintes e características de um resíduo, para isso envolvem a identificação da atividade que o gerou. Para padronização do uso de resíduo, existe um conjunto de normas regidas pela ABNT, sendo os resíduos sólidos classificados de acordo com a NBR 10004/2004, em:

- a) Classe I - Perigosos
- b) Classe II - Não-Perigosos
 - Classe II A - Não-inertes
 - Classe II B - Inertes

São classificados como classe I ou perigosos os resíduos que, em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade e toxicidade, podem apresentar: a) risco à saúde pública, provocando ou contribuindo para um aumento da mortalidade ou incidência de doenças e/ou dispostos de forma

inadequada; b) riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

Ainda conforme ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - (2004), a propriedade de toxicidade é medida pelo teste de lixiviação, definido pela norma NBR 10004/2004. Os poluentes no extrato lixiviado devem apresentar teores de poluentes superiores aos padrões do anexo F, da norma NBR 10004/2004, para o resíduo ser classificado como perigoso.

Os resíduos não-inertes ou classe II-A são aqueles que não se enquadram tanto na classe I (perigosos) como na classe II-B (inertes). Podem apresentar propriedades de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Os resíduos inertes ou classe II-B (inertes) são aqueles resíduos sólidos ou mistura destes que, submetidos ao teste de solubilização, não tenham nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões definidos no anexo G da NBR 10004/2004, que são padrões para o ensaio de solubilização.

A (FIG.4) ilustra em esquema as classes de resíduos conforme está descrito acima.

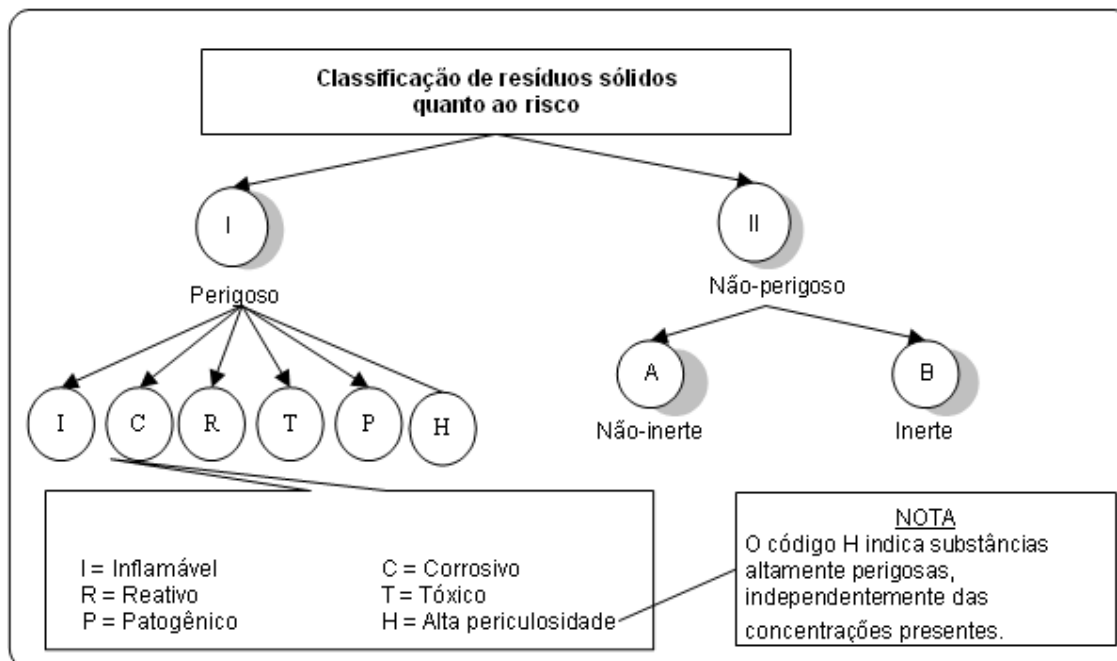


FIGURA 4 – Classe de resíduos

FONTE: Lafarge Brasil (2003) adaptada.

Vantagens do Co-Processamento em Fornos de Cimento

-Temperaturas elevadas: Os fornos de cimento apresentam uma temperatura máxima de 1450° C, podendo alcançar a 2000°C na zona de queima do combustível no forno e 1100°C no pré-calcinador, assegurando assim uma alta taxa de destruição dos resíduos pelas elevadas temperaturas.

-Tempo de residência elevado dos gases: O tempo de residência total ou de permanência dos gases resultantes da combustão/incineração num forno de cimento é de cerca de 5 a 10 segundos e no pré-calcinador esse tempo de residência é da ordem de 3 segundos.

-Inércia térmica elevada: As inconvenientes emissões resultantes das paradas nos fornos, não ocorrem nos fornos de cimento, pois se tem uma elevada inércia térmica. Esta é obtida pela quantidade ampla de matéria-prima no interior do forno. Assim, retarda o abaixamento da temperatura quando ocorrem paradas momentâneas ou alterações operacionais no forno.

-Meio alcalino – Devido ao calcário presente na matéria-prima, o ambiente no interior do forno de cimento torna-se alcalino. Desse modo, os gases e os vapores ácidos, sejam o dióxido de carbono (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2), ácido clorídrico (HCl) e ácido fluorídrico (HF) são neutralizados e em grande parte absorvidos pelo clínquer.

-Metais pesados: Como o forno apresenta um meio alcalino, os metais pesados presentes nos resíduos têm um ambiente químico extremamente favorável para serem absorvidos pelo clínquer. As taxas de absorção dos metais pesados são de um modo geral bastante elevada”. (RENÓ, 2007, p.35).

Desvantagens do co-processamento em Fornos de Cimento

De acordo com documento Lafarge Brasil (2003) para o co-processamento de resíduos existem algumas limitações que devem ser consideradas, podendo citar a limitação para elementos químicos, como: mercúrio, tálio e cromo, pois quando presentes no quimismo do resíduo deverão ser rigorosamente bem dosados no processo. A presença de cloretos deve ser bem avaliada devido ao processo de circulação e ao poder de acúmulo deste elemento dentro forno podendo ocasionar incrustações no sistema.

Outro fator é o alto custo inicial do projeto de adaptação do processo e para a obtenção do licenciamento ambiental.

No geral, a preparação dos combustíveis envolve etapas importantes nos processos, tais como a qualidade do combustível, que quase sempre está associada à natureza do mesmo e sua verificação, a mixagem e dosagem, a mistura, a secagem, o sistema moagem que atribui finura aos combustíveis convencionais (carvão e coque).

Quanto ao óleo combustível, ele depende de ser mantido a uma temperatura ideal para controle de sua viscosidade, fator principal para uma boa aplicação na combustão, e a utilização de resíduos como combustíveis alternativos, é essencial que para estes sejam estabelecidos métodos rigorosos de monitoramento, pois se trata de materiais não convencionais (resíduos industriais).

As etapas que compõe a preparação conferem aos combustíveis atributos que influenciam na efetividade das reações de combustão e caracterizam uma complexidade de ações e reações que serão estudadas, pois estão associadas à qualidade do cozimento e à formação e dissolução da colagem durante processo produtivo do clínquer.

3.4.5 O processo de queima do clínquer

Conforme documento da Lafarge Brasil (1998), o clínquer é obtido a partir da fusão parcial e combinação, em proporções convenientes, de matérias-primas que contenham os componentes necessários à sua produção, que são: a cal (CaO), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e sílica (SiO_2). Estes componentes raramente se encontram nas proporções desejadas para a fabricação do clínquer, em uma única substância. Portanto é necessário misturar um componente rico em cal (o calcário), com outro pobre em cal, porém rico em alumina, óxido de ferro e sílica (a argila).

O processo de queima do clínquer acontece a altas temperaturas, com isso é sempre um grande desafio utilizar energia térmica de forma eficiente. O processo é baseado expondo o material processado a uma chama que é a fonte principal de calor.

Ainda neste documento, percebe-se que no processo acontecem as três formas de transferência de calor, sendo forma dominante a transferência de calor por radiação, fato que acontece entre a chama e o material, também existe a transferência de calor por convecção que acontece entre o gás e o material, e por condução, onde a parede do forno que recebeu calor por radiação, troca calor com o material quando entra em contato com o mesmo. Os níveis de aquecimento são altíssimos podendo a temperatura da chama chegar em torno 2000°C e por conseguinte os gases conduzem esta alta temperatura e resulta nas efetivas formas de transferência de calor.

“O clínquer é produzido a partir de uma mistura de matérias-primas contendo cálcio, silício, alumínio e ferro como principais elementos. Quando misturado na corretas proporções, novos minerais com propriedades hidráulicas - chamadas fases do clínquer - são formadas após aquecimento até a sinterização (ou clinquerização), temperatura tão elevada como 1450°C. Os principais componentes minerais do clínquer são os silicatos, aluminatos e ferritas do elemento cálcio”. (CEMBUREAU, 1999, p. 19, tradução do autor).

A transformação do cru em clínquer compreende etapas de troca de calor entre dois fluxos, sendo um fluxo de material e um fluxo gasoso. A troca de calor se efetua em contra corrente e o material é aquecido por convecção ao contato com os gases.

Conforme documento Lafarge Brasil, Cecil (2003), a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃) e o óxido de ferro (Fe₂O₃). Uma pequena porcentagem de magnésio (MgO), anidrido sulfúrico (SO₃), óxido de titânio (TiO₂) e ainda substâncias de menores como óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O) - denominados álcalis - . Todas estas substâncias são obtidas das matérias-primas, mas algumas são resultantes da incorporação de cinzas provenientes dos combustíveis. Tais constituintes relacionados finamente pulverizados e homogeneizados compõem o cru ou farinha que são submetidos à ação do calor no interior do forno rotativo a temperatura de fusão incipiente, que resulta na obtenção de clínquer.

Conforme Alsop (2005), a alimentação do forno é sujeita a sucessivas reações com incremento de temperatura, que são:

- Temperatura em torno de 100°C - Ocorre a evaporação da água livre num processo denominado de secagem;
- Temperatura acima de 500°C - Ocorre a desidratação da água combinada da argila num processo denominado de preaquecimento;
- Temperatura acima de 900°C - acontece a reação de calcinação e início de reações entre CaO e Al₂O₃, Fe₂O₃ e SiO₂.

A calcinação ocorre de acordo com a reação química: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$;

- Temperatura acima de 1200°C ocorre a formação de fase líquida;
- Temperatura acima de 1280°C acontece a reações de formação dos minerais do clínquer e a completa reação do CaO com C₂S obtendo o C₃S. Sendo denominado como reação de clinquerização.

Segundo Signoretti (2008), a uma temperatura de 100°C acontece a evaporação da água livre, a decomposição do carbonato de Magnésio ocorre a uma temperatura de 340°C, em temperaturas entre 850 e 1250°C ocorre a sinterização, a reação entre o óxido de cálcio e as substâncias sílico-aluminosas, com a formação do produto final, constituindo os tri-cálcicos ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) e ferro-aluminatos tetra-cálcicos ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). A TAB. 3 apresenta as principais etapas de reações de formação do clínquer e seus respectivos processos de troca de calor.

TABELA 3 – Principais etapas de reações de formação do clínquer e respectivos processos de troca de calor.

TEMPERATURA	PROCESSO	TROCA CALOR
100°C	Evaporação da água livre	Endotérmico
340°C	Decomposição do Carbonato de Magnésio	Endotérmico
550°C	Desidroxilação da argila e reação do SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 com o calcário.	Exotérmico
305°C a 1000°C	Decomposição do carbonato de cálcio	Endotérmico
1000°C a 1200°C	Formação do $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ desaparecimento do SiO_2 livre	Exotérmico
1250°C a 1280°C	Início da formação de fase líquida.	Exotérmico
1400°C a 1450°C	Complementação da formação do $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ e $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$. Desaparecimento de CaO livre por reação com o $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, para formar $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$.	Exotérmico

FONTE: Locher (2005a *apud* Signoretti, 2008, p.47) ⁵.

Nos fornos via seco os gases quentes que saem do forno são utilizados para secar e peletizar o cru antes do mesmo entrar no forno. Deste modo, este tipo de forno não possui a zona de secagem fazendo com que a primeira zona passe a ser a zona de pré-aquecimento.

Convém salientarmos que, um forno de via seco com pré-aquecedor, este se encarrega de secar e pré-aquecer o material até a temperatura inicial da calcinação.

⁵ Locher, G. (2005a), "Modelos Matemáticos Del Proceso de Cocción del Clinker del cemento Parte 1: Reacciones y Operaciones Básicas", Cemento Hormigon, Enero, n 871, pp 4-15.

Assim, iniciando da extremidade mais elevada, a primeira zona é a da calcinação, como mostra a (FIG. 5).

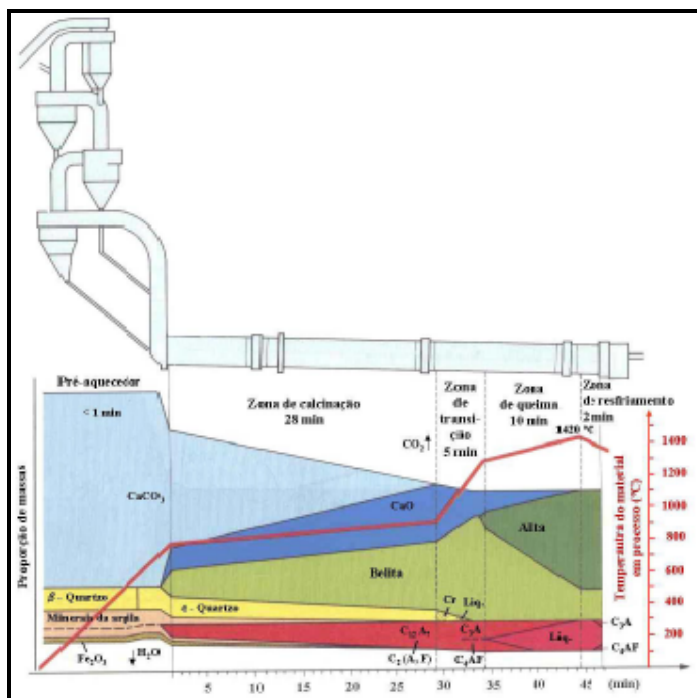
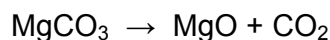


FIGURA 05 - Forno via seco com delimitações por zonas os quais define as etapas de reações que acontecem durante o processo de queima.

FONTE: Cárpio (2005)

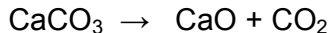
Conforme documento Lafarge Brasil (1998), na zona de pré-aquecimento ocorrem às primeiras reações, onde se aquece o material e acontece a evaporação da água livre, a evaporação da água de cristalização das argilas, a desidroxilação dos minerais argilosos e a decomposição do carbonato de magnésio, além de aquecer o material até a temperatura inicial da calcinação, entre 700 e 800°C.

Reação de decomposição do Carbonato de Magnésio:



Documento Lafarge Brasil (1998), diz que a zona de calcinação tem seu início na entrada do forno e se alonga até o início da zona de transição. O material percorre esta zona vindo a alcançar maiores temperaturas à medida que vai avançando. A temperatura nesta região fica entre 900 a 1050°C propiciando a completa descarbonatação do Carbonato de cálcio.

Reação de decomposição do Carbonato de Cálcio:



“O dióxido de carbono (CO_2) se dissocia do cru e é carregado pelos gases. Normalmente o processo de calcinação se finaliza a poucos metros antes da zona de transição/queima. O material deve estar completamente calcinado antes de entrar na zona de queima. Se isto não acontecer, a queima do material será difícil, sendo essa uma das principais causas das condições de transtorno do forno. Deste modo, a calcinação completa do material, antes do mesmo entrar na zona de queima, é essencial para uma queima apropriada do clínquer”. (PERAY, 1986, p, 142 tradução do autor).

A zona de transição é a parte do forno que se encontra entre a zona de calcinação e a zona de clinquerização/queima. De acordo com Cárpio (2005), normalmente esta zona se divide em duas partes, uma fria (zona de segurança) e outra quente. A temperatura do material nesta zona pode variar entre 950 e 1300°C. Neste ponto, a calcinação já está completa e o material continua sendo aquecido.

Documento Lafarge Brasil (1998) relata que nesta região inicia-se a formação da fase líquida, formando primeiramente os compostos $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ chamado de C_3A e $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ chamado de C_4AF . Estas reações acontecem devido elementos que compõem o cru possuem baixo ponto de fusão e uma tendência de entrar em estado pastoso. Tais elementos são chamados de fundentes e são importantes na cinética das reações subseqüentes do forno, pois oferecem uma maior superfície de contato facilitando a interação entre os diversos componentes da mistura reagente.

A zona de clinquerização/queima ou de sinterização inicia após a zona de transição, estendendo até a zona de resfriamento. É nesta zona que o produto final é obtido.

Segundo estudo da ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - (1984), a clinquerização constitui em um conjunto de reações físico-químicas, a partir da mistura crua, tendo como produto final o clínquer. Estas reações conduzem a formação dos componentes principais o silicato tricálcico (C_3S) e o silicato bicálcico (C_2S) pelo fenômeno de difusão iônica entre sólidos, que é acelerada pelo aparecimento de fase líquida localizada na interface dos grãos e que começa a se formar à temperatura próxima de 1300°C, logo a velocidade de difusão e

consequentemente a capacidade de clinquerização, estão relacionadas à quantidade e à viscosidade da fase líquida.

O documento da Lafarge Brasil (1998) relata que a mistura crua que está rica em cal e contém sílica, alumina e óxido de ferro, além de pequenas porcentagens de outros óxidos, é aquecida pela radiação da chama e das colagens até a temperatura de clinquerização. O comportamento do material nesta região normalmente é pegajoso/viscoso e granulado e acompanha até certa altura o movimento de rotação do forno. Este movimento coloca em exposição às superfícies do material, proporcionando uma melhor troca térmica. O processo de reações desta região é chamado de clinquerização, pois é caracterizado pela liquefação dos constituintes do clínquer. A formação do componente mais importante, o silicato tricálcico (C_3S), não se inicia até que o material atinja a temperatura de aproximadamente $1260^{\circ}C$. Com o aumento da temperatura, mais C_3S é formado, o que significa que mais cal combinará com a sílica. Ao se atingir uma temperatura entre 1370 e $1450^{\circ}C$, a cal livre desaparecerá completamente. Esta temperatura assegura que o clínquer teve uma boa queima e que o mesmo será de boa qualidade.

A zona de resfriamento inicia logo após o material passar pela região mais quente da chama até a caída do material para o resfriador. Nesta região ocorre o primeiro resfriamento do clínquer, o qual tem influências bastante significativas para manutenção dos cristais dos compostos silicato bicálcico (C_2S) e de silicato tricálcico (C_3S) produzidos na zona de queima.

Segundo estudo da ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - (1984), o resfriamento do clínquer é uma fase mais importantes de sua formação, pois dele depende a estabilidade, o idiomorfismo e a decomposição dos cristais de alita (C_3S), a formação de belita secundária (C_2S), o conteúdo de cal livre secundária e a formação de periclásio e do aluminato cálcico.

Ainda conforme estudo supracitado, são considerados dois tipos de resfriamento. Um que ocorre entre a zona de clinquerização e a boca de saída do forno e outro que ocorre no resfriador industrial. O primeiro resfriamento quando adequado, condiciona principalmente a estabilidade dos silicatos, ou seja, da alita e belita. O segundo resfriamento condiciona principalmente a cristalização ou vitrificação da fase intersticial e do periclásio.

Conforme documento da Lafarge Brasil (1998), de um modo geral pode-se dizer que a qualidade do clínquer é tanto melhor quanto maior a velocidade de resfriamento. O tempo determinado ao resfriamento do clínquer está ligado diretamente à rotação e as condições do tamanho da chama, e após a caída para o resfriador, o clínquer é resfriado com ar para uma temperatura em torno 100 a 200°C, sendo a transferência de calor por condução e convecção. Este resfriamento instantâneo é chamado de têmpera, importante para a estabilização dos cristais do clínquer, em seguida o produto é transportado para silos de estocagem.

3.4.6 Composição mineralógica do clínquer

O processo de queima é responsável pelas reações químicas dos elementos que resultarão em uma nova composição mineralógica do clínquer, que será responsável por propriedades hidráulicas no cimento.

Segundo Marciano, (1991), a composição mineralógica do clínquer é constituída principalmente dos silicatos de cálcio, os aluminatos, ferro-aluminatos, Periclásio, $\text{CaO}_{\text{livre}}$ e de constituintes chamados de secundários arcanita, oldhamita, wustita, aphisitalita, langbenita, Fe^0 .

Os constituintes Principais:

Silicato Tricálcico – Ca_3SiO_5 – C_3S – Alita
 Silicato Bicálcico – Ca_2SiO_4 – C_2S – Belita
 Aluminato Tricálcico – CaOAl_2O_6 – C_3A
 Ferro-Aluminato Tetracálcico – $\text{CaO}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ – C_4AF
 Periclásio – MgO
 Cal livre – $\text{CaO}_{\text{livre}}$

Os constituintes secundários:

Arcanita – K_2SO_4
 Aphisitalita – $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$
 Langbeinita – $\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3$
 Oldhamita – CaS
 Wustita – FeS
 Fe^0

De acordo com ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland - (1984), o clínquer compõe-se principalmente de quatro fases, que são identificadas com as

abreviaturas clássicas de C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF . O C_3S (alita), de todos os componentes do clínquer, este é o que apresenta maior influência no desenvolvimento das resistências mecânicas a todas as idades do cimento, liberando uma grande quantidade de hidróxido de cálcio e alto calor de hidratação durante as reações hidráulicas. Já o C_2S (belita) tem, também contribuição na resistência aos esforços mecânicos do cimento, agindo em idades mais longas. Em comparação com a alita, desprende menor calor de hidratação e libera menor quantidade de cal durante as reações hidráulicas.

Ainda conforme ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland – 1984), o C_3A tem um papel importante na resistência dos cimentos quando exposto a águas agressivas, isto devido ao seu tipo de cristalização. Quanto a sua hidratação, reage rapidamente com água, conferindo ao cimento juntamente com o C_3S , resistência inicial às solicitações mecânicas. O C_3A tem efeito interativo (catalisador) no comportamento do C_3S , onde o desenvolvimento de resistência nas primeiras idades depende de seu conteúdo no cimento. O C_3A é o componente que apresenta maior calor de hidratação, o que lhe confere a responsabilidade pela pega do cimento durante as reações hidráulicas. Por fim o C_4AF , apresenta valor hidráulico baixo e tem pequena participação na resistência aos esforços mecânicos do cimento. Sua propriedade principal é a resistência à corrosão química, ele também é responsável pela coloração cinzenta do clínquer, dada à presença de ferro na sua composição.

3.4.7 Forno rotativo

Conforme Nielsen (1991) existe dois tipos de fornos rotativos destinados à produção do clínquer, que são forno de via úmido e o forno via seco. Nas últimas décadas a construção de fornos via úmido têm caído drasticamente devido os altos custos de produção. O forno via seco por possuir uma tecnologia mais avançada, possuem características vantajosas como: Baixo consumo calorífico, ou seja, Kcal/kg de clínquer, baixo consumo energético – kWh/kg de clínquer, unidades com maior capacidade produtiva, características que asseguram a viabilidade da produção.

O autor supracitado relata que nos sistemas modernos de fornos via seco o pré-aquecimento da farinha crua até a temperatura de calcinação ocorre em ciclones pré-aquecedores e a maior parte do processo de calcinação pode ocorrer em um

calcinador fixo. O restante da calcinação assim como o aquecimento final e o processo de clínquerização é realizado dentro do forno rotativo, sem partes interiores. O resfriamento do clínquer ocorre em um sistema de arrefecimento por grelhas, que possibilitam o reaproveitamento dos gases quentes provenientes das trocas térmicas, que tem papel importante no processo de queima.

O foco deste trabalho de pesquisa é no forno via seco com pré-calcinador de cinco estágios da fabricante Polysius, modelo no qual a empresa Lafarge Brasil produz seus produtos.

De acordo com Nielsen (1991), o forno usado para clínquerização consiste basicamente de um cilindro com comprimento e diâmetro variáveis, onde o comprimento padrão do forno é selecionado para 17 vezes o diâmetro interno do forno. O comprimento do forno depende principalmente do tempo necessário para se elevar os materiais do produto em processo à temperatura de "clínquerização".

O forno é instalado com um declive de aproximadamente 3% entre o local de alimentação e o final do queimador, e tem rotação entre 1 a 4 RPM. O material cru é alimentado na parte mais alta e percorre o forno em declive.

Segundo Fusaro (1990), a parte externa do forno, a qual fica em contato com o ambiente externo, é composta por uma chapa de aço cuja espessura varia ao longo do comprimento do forno. Devido às altas temperaturas existentes dentro do forno durante o processo de fabricação do clínquer, é necessário proteger a chapa de aço do forno com uma camada de refratários, formando dois cilindros concêntricos e em contato (justapostos). Sem esta proteção a chapa de aço se desintegraria em poucas horas. Um refratário é um material usualmente não metálico, que é usado para suportar altas temperaturas. Num forno, o refratário usualmente consiste de tijolos de composição e tamanho especiais. As características dos refratários e suas funções serão conceituadas e detalhadas em capítulos próximos, pois a refratariedade do forno rotativo é um ponto que está diretamente ligado ao objeto de estudo que é a formação e dissolução de colagem.

No forno via seco com pré-aquecedor, consiste em um sistema onde todo oxigênio necessário para combustão no pré-calcinador é fornecido pelo queimador primário e pelos gases recuperados do resfriamento do clínquer (Ar secundário), que percorre internamente toda extensão do forno rotativo numa mistura com o fluxo gasoso até o pré-calcinador.

Signoretti (2008) diz que a baixa concentração de oxigênio no equipamento é devido à diluição do fluxo gasoso, proveniente do forno rotativo, e em parte é compensada pela alta temperatura da mistura gasosa, resultando em uma melhor combustão.

A (FIG. 6) ilustra o forno rotativo destinado à produção de clínquer.



FIGURA 6 – Forno rotativo via seco para produção de clínquer.

FONTE: Lafarge Brasil (2009).

A (FIG. 7) ilustra o interior do forno rotativo em diferentes fases de operação.

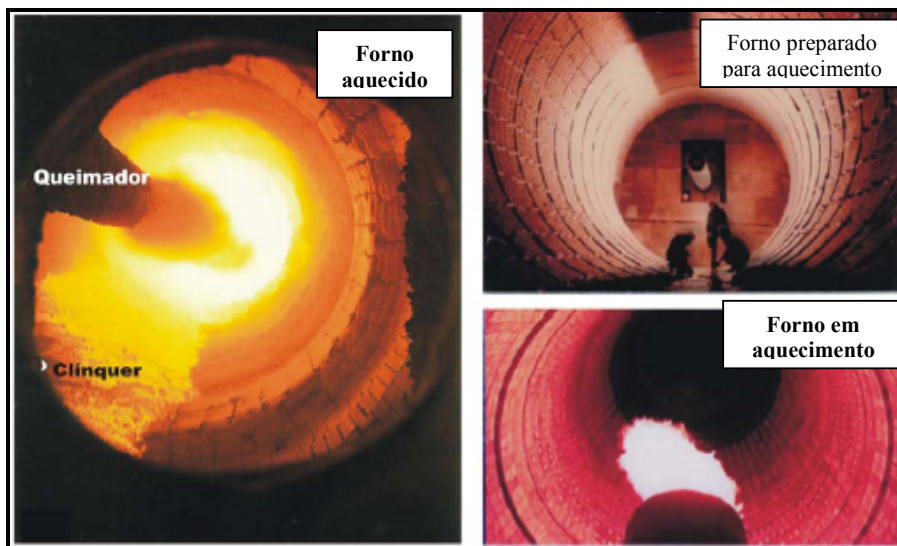


FIGURA 7- Interior do forno rotativo.

FONTE: Signoretti (2008)

A (FIG. 8) mostra um esquema de forno rotativo via seco com pré-aquecedor, com identificação do percurso e temperatura em que o material, os gases e os combustíveis fazem durante o processo de queima do clínquer.

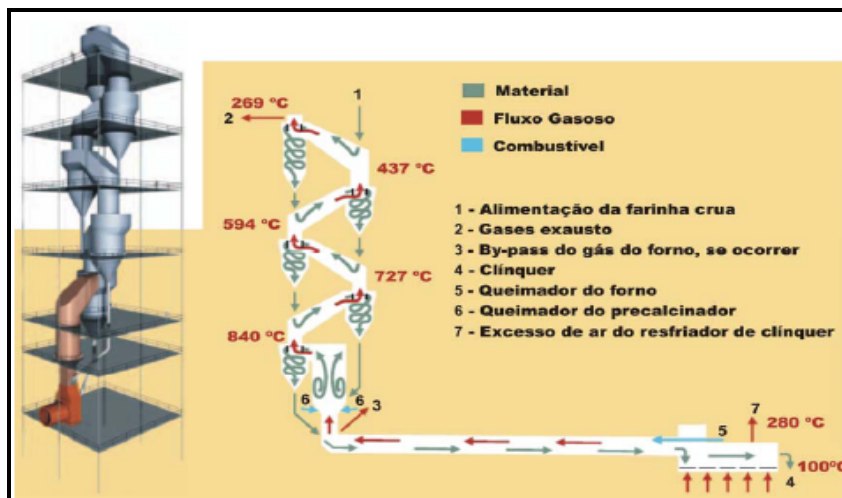


FIGURA 8 – Esquema de forno rotativo com pré-calcinador em linha.

FONTE: FLSmitdh (2006b) *apud* Signoretti, (2008)⁶.

3.4.8 Resfriamento

O processo de formação do clínquer ainda não está completo quando o material passa pela área mais quente da zona de queima. A maneira conforme o clínquer é resfriado tem influência na sua qualidade. Uma vez que a formação dos compostos já está completa e o clínquer atingiu a temperatura de aproximadamente 1400°C, parte dos componentes está em estado líquido e outras em estado sólido.

Documento da Lafarge Brasil, Cecil (2003) diz que o resfriamento do clínquer se inicia a poucos metros de sua descarga. Dependendo da localização da chama, o resfriamento pode ser lento ou rápido por causa da diferença de tempo em que o clínquer permanece no forno depois de ter sido queimado. A velocidade do resfriamento, ou seja, o tempo requerido para que todo o líquido do clínquer seja solidificado, é importante. Em geral, o resfriamento rápido é benéfico para a qualidade do clínquer, pois mantém as características de suas fases cristalográficas, resultando numa melhor moagem.

⁶ FORNO COM PREAQUECEDOR (2006b) disponível em <html:www.FLSmidth.com>, acessado em 31/08/2006.

Depois de sair do forno, o clínquer passa por um resfriador, onde, sua temperatura pode chegar aproximadamente 100 a 200°C, a partir daí o clínquer é estocado em silos.

De acordo com documento Lafarge Brasil (1998), o resfriador de clínquer é um importante equipamento para indústria de cimento, pois, sua função é o resfriamento do material sinterizado no forno, proporcionando redução de temperatura para armazenamento, recuperação de calor para o ar secundário e resfriamento rápido para obter o arranjo cristalino do clínquer.

“O resfriador de clínquer é um equipamento integrante do sistema do forno, influencia o desempenho e a economia da indústria cimenteira e tem por finalidade recuperar o máximo de calor do clínquer quente (1450°C) na saída do processo, além de propiciar um rápido resfriamento do clínquer mantendo as características de suas fases cristalográficas. A recuperação de calor é feita pré-aquecendo o ar usado para combustão na queima principal e secundária”. (SIGNORETTI, 2008, p.65).

A (FIG. 9) mostra um sistema de arrefecimento de grelhas (que é o caso da Lafarge - unidade Arcos), no qual o ar aquecido aproveitado do resfriamento do clínquer, que é chamado de ar secundário, percorre internamente toda extensão do forno contribuindo para reações de combustão e com todo o processo de obtenção do clínquer.



FIGURA 9 – Sistema de Arrefecimento de grelhas.

FONTE: Lafarge Brasil (1998)

3.4.9 A moagem do cimento Portland

O processo de fabricação do cimento é caracterizado por um processo de moagem das matérias-primas que compõem o cimento Portland. Vale ressaltar que nem todo fabricante de cimento é produtor de clínquer, isto por que eles desenvolvem somente a atividade de moagem, vindo a adquirir através de compra ou não, os componentes do cimento Portland.

Seguindo uma seqüência lógica do processo de fabricação do cimento Portland, o início se dá ao conhecer todas as características, propriedades, as matérias-primas que compõem o cimento Portland e os itens que certificam a qualidade. A partir daí o processo de fabricação do cimento é definido como um processo de moagem que utilizam sistemas de moinhos tubulares chamados de moinhos de bolas, que tem seu interior revestido por placas protetoras e classificadoras confeccionadas por aço resistente a impacto e o contendo corpos moedores (bolas) de vários tamanhos.

De acordo com documento Lafarge Brasil (1998), no moinho de bolas, o processo de moagem é uma combinação entre o impacto dos corpos moedores contra as partículas a serem moídas, isto acontece na primeira câmara, e a fricção quando o material é exposto ao movimento relativo entre dois corpos moedores. O atrito e a fricção entre os elementos são causados pelo movimento rotacional do sistema, tal processo reduz o tamanho das matérias-primas que compõem o cimento em partículas finas e homogêneas. Este tipo de equipamento está ilustrado pela (FIG. 10).

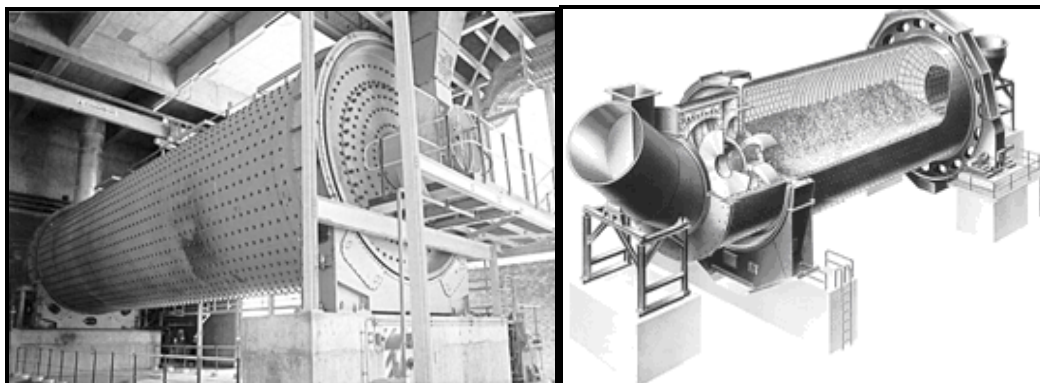


FIGURA 10 – Representação de moinho tubular de bolas, sendo uma foto externa e um desenho com um corte demonstrando a parte interna do moinho.

FONTE: Lafarge Brasil (1998).

A moagem do cimento ocorre em um circuito fechado, onde balanças dosadoras são usadas para mensurar a quantidade de matérias-primas que irão compor um determinado tipo de cimento, isto definido por um sistema automatizado baseado em tabelas de proporções e limites estabelecidos pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) que é baseada em itens de qualidade.

O processo também é composto por um separador de partículas, que por rotação e aeração, separa as partículas finas destinando-as para silos de estocagem de produto acabado, das partículas grossas retornam para o sistema, com objetivo de atingir a finura (superfície específica) necessária para garantir a qualidade do cimento. A (FIG. 11) ilustra toda a etapa do sistema de moagem do cimento através de um fluxograma.

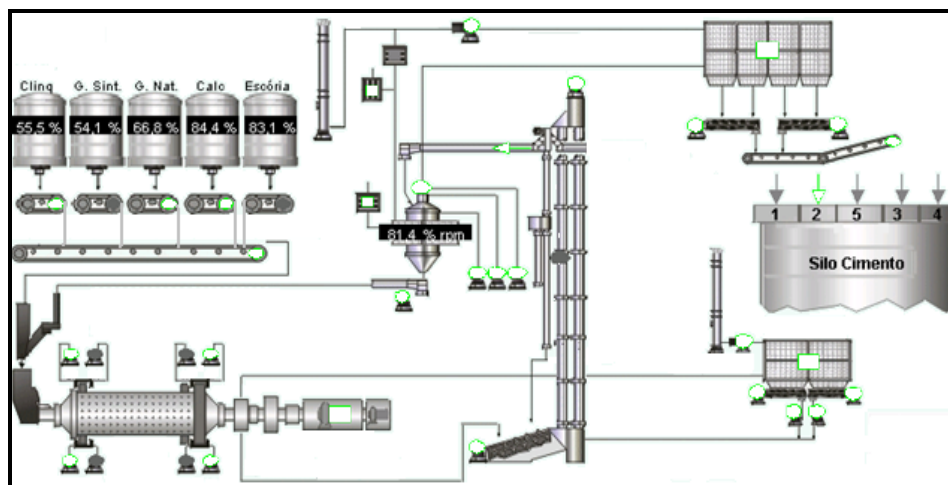


FIGURA 11 - Fluxograma do sistema de moagem.

FONTE: Lafarge Brasil (2003).

De acordo com ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - (1998), a determinação da superfície específica (finura), serve para checar a uniformidade do processo de moagem de uma fábrica. A finura do cimento é determinada como superfície específica, observando-se o tempo requerido para uma determinada quantidade de ar fluir através de uma camada de cimento compactada, de dimensões e porosidade especificadas, sob condições normalizadas, a superfície especificada do cimento é proporcional ao tempo para determinada quantidade de ar atravessar a camada compactada de cimento.

Os principais controles deste processo começam pela confiabilidade das dosagens e características da matéria-prima, o controle rotacional do separador, sendo que quanto maior a rotação, mais fino será o produto final com ressalva que, a finura é uma das características preponderantes para controle de qualidade estando relacionada diretamente a resistência de concretos e argamassas quando há a utilização do cimento, também é controlada a temperatura do processo de moagem e controles de aeração do sistema. A partir daí o produto é estocado em silos, ensacado e vendido ao consumidor.

3.5 Colagem

“Colagem é a massa de clínquer ou de partículas de pó que se aderem à parede do forno, tendo partido de um estado líquido ou semilíquido (viscoso), para o estado solidificado. As partículas sólidas aderem à superfície da colagem (S1 FIG.12) ou na superfície do refratário (S2 FIG.12), quando não existe colagem, enquanto a temperatura da superfície da colagem é menor que a temperatura de solidificação das partículas. A colagem continua a se formar até sua superfície atingir a temperatura de solidificação. Quando o forno é operado sob condição de equilíbrio, a colagem se manterá por si mesma. Isto significa que, teoricamente, nenhuma nova colagem é formada. Porém, quando esta temperatura é excedida, as partículas da superfície da colagem mudam novamente do estado sólido para o estado líquido, e a colagem começará a desprender. Existe uma queda de temperatura entre a superfície da colagem (S1) e a superfície da chapa de aço (S3), o calor flui na direção indicada pela seta na (FIG. 12). Esta transferência de calor é governada em grande parte pela condutividade do refratário e da colagem. Quanto maior a condutividade do refratário, maior será a mudança na formação da colagem, isto porque mais calor será transferido na direção da seta, e conseqüentemente menor será a temperatura na superfície da colagem. O calor que passa através da parede do forno deve ser constantemente reposto pela chama para se manter uma condição de equilíbrio necessária para a formação da colagem”. (PERAY, 1986, p. 147 e 148, tradução do autor).

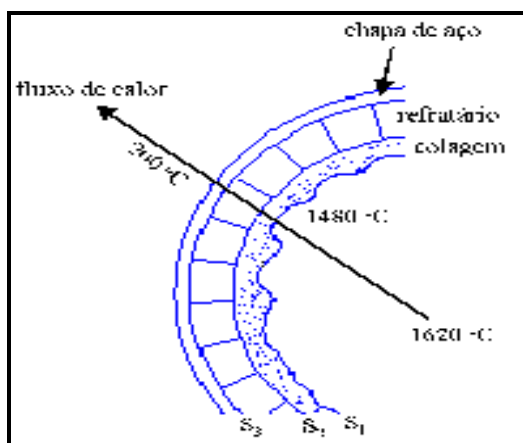


FIGURA 12 - Esquema da formação de colagem e o fluxo de perda de calor através da parede do forno.

FONTE: Peray (1986).

Conforme Marciano (1991), a incrustação ou colagem é o material mais ou menos compacto que recobre ou obstrui certas partes do forno, de forma desejável ou não, e cujas características físicas e químicas são variáveis, conforme o local de ocorrência.

3.5.1 A colagem da zona de clinquerização.

Conforme Marciano (1991), a formação da colagem na zona de clinquerização caracteriza um aspecto de extrema importância para o processo produtivo. A colagem nesta região tem por função as seguintes características:

- proteção da camada de refratários contra o superaquecimento e variações bruscas de temperatura (melhoramento na distribuição do calor);
- proteção do revestimento de refratários contra o efeito abrasivo da carga de clínquer em movimento e do pó em suspensão;
- proteção do revestimento de refratários contra ataques químicos dos componentes do clínquer, da cinza do combustível e da atmosfera dos gases;
- suporte ao efeito da mistura, isto é, melhora da mistura da massa de clínquer devido à rugosidade da superfície da colagem;
- redução da radiação de calor e proteção da carcaça (virola) do forno contra sobrecargas térmicas.

Marciano (1991) argumenta que a formação de colagem na zona de queima, desde que não seja excessivamente espessa, é benéfica para o processo, pois caracteriza a formação de uma camada protetora que preserva a vida útil do refratário e possibilita uma redução de perdas de energia térmica. Sem a formação da incrustação ou colagem, o consumo de refratário e a perda de calor inviabilizariam o processo de fabricação.

A (FIG. 13) ilustra uma satisfatória formação de colagem na zona clinquerização e o leito de clínquer, esta foto ilustrativa foi obtida com forno parado do local onde é posicionado o maçarico principal. A (FIG. 14) ilustra o interior do forno rotativo em operação, com injeção de combustível pelo maçarico principal. Em detalhe pode-se verificar uma região com despreendimento de colagem, outra sem formação de colagem e outra com início de formação de colagem na parede de refratário.

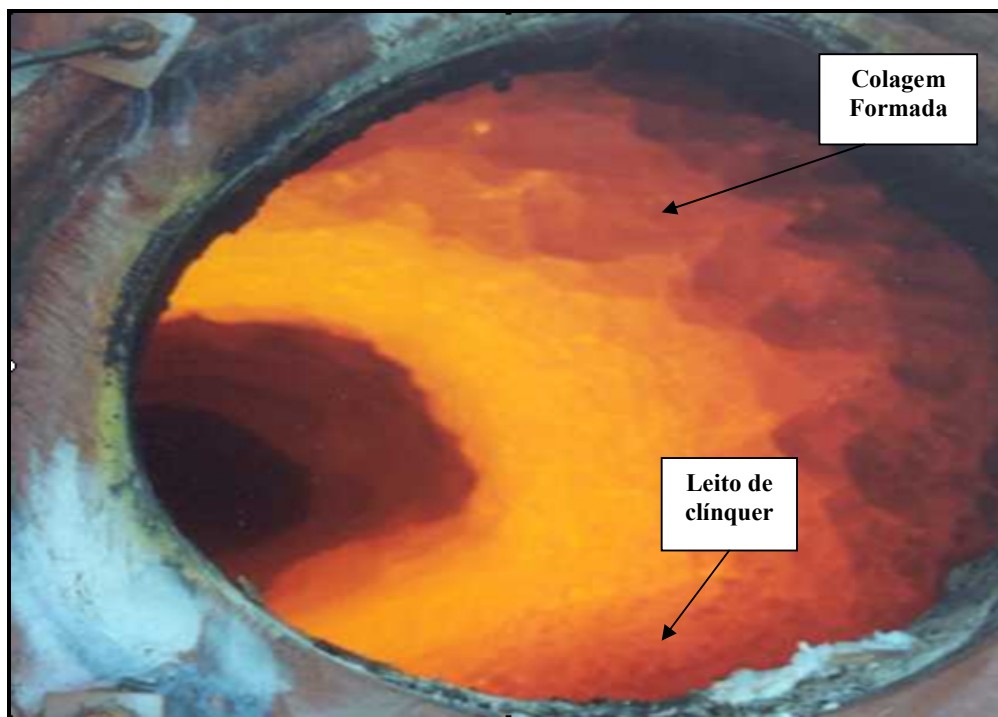


FIGURA 13 - Formação da colagem na zona de queima do forno de clínquer.

FONTE: Lafarge Brasil (2001)

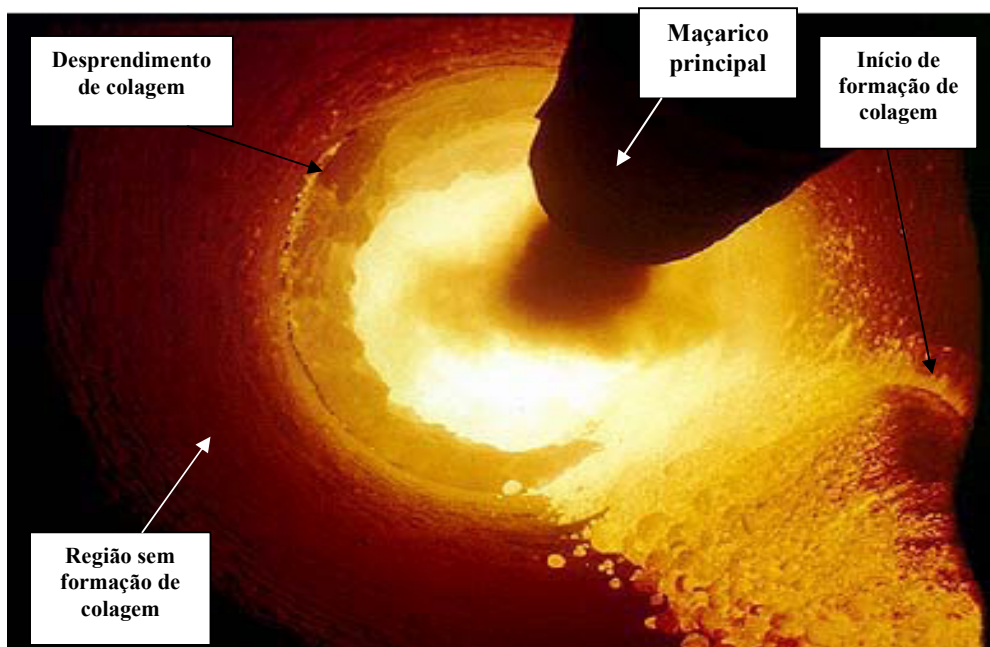


FIGURA 14 – Formação de colagem no interior do forno

FONTE: TEMARRY *apud* SALOMON, p.22 (2002)⁷.

⁷Recicladora Temarry de México S.A de C.V., "Products and Services Directory, Cement Kilns, Energy Recovery". On-Line. Disponível em: www.temarry.com.br acesso em 30/09/2002

3.5.1.1 A formação descontrolada de Colagem.

De acordo com Marciano (1991), as colagens podem ocorrer internamente no forno, constituindo os chamados “Anéis” quando muito espessas, ou externamente ao forno, nos vários estágios dos pré-aquecedores, na torre de ascensão, nas pás do exaustor, etc. Em todas essas situações apresentam caráter prejudicial ao processo, pois podem impor limitações ao fluxo normal do cru, do clínquer ou dos gases.

Existem três tipos distintos de anéis, que são:

- Anéis que se formam na descarga do forno;
- Anéis que se formam logo após a zona de clínquerização (anéis de clínquer);
- Anéis que se formam no fundo do forno (anéis de sulfato).

Os anéis e a formação de colagem na caixa de fumaça serão estudados no capítulo 3.5.3

A colagem consiste de partículas que mudam do estado líquido para o sólido, a natureza e a quantidade dos materiais que se fundem à temperatura de clínquerização desempenha um papel importante na formação da colagem sendo necessário estudá-los e identificar critérios de controle.

3.5.2 Fatores que influenciam na formação e dissolução da colagem.

De acordo com Marciano, (1991), cada tipo de incrustação ou colagem corresponde a uma mineralogia particular, que depende das condições reinantes de temperatura, pressão e natureza dos gases presentes no processo. Esses três fatores condicionam, fundamentalmente, a estabilidade e a composição mineralógica da colagem, embora outros fatores também contribuam para a formação dos minerais. Fatores como, a característica física, química e mineralógica do cru, o tipo e a composição química do combustível (teor de cinzas ou de enxofre do coque), o comprimento ou formato da chama, a natureza e a característica do revestimento refratário e condições operacionais do processo (a marcha do forno), são também, fatores importantes e que em determinadas circunstâncias, podem ser considerados principais.

De acordo com Gontijo e Oliveira, (1991), com relação ao forno (na zona de clinquerização), é importante possuir um tijolo de qualidade, com característica de desenvolver e reter colagem, mesmo quando ocorrem choques térmicos devido a uma parada não programada. Portanto um tijolo de qualidade também é fator preponderante para estabilização da colagem, pois seu desempenho depende de fatores que afetam a estabilidade desta colagem, dentre os quais se destacam o tipo de matéria-prima no preparo do cru, a finura na moagem, o grau de homogeneidade dos parâmetros de controle do cru, a qualidade ou o tipo do clínquer requerido pelo mercado, o projeto mecânico do forno, o grau de enchimento do forno durante a operação, o controle da chama, o tipo do queimador, a carga térmica aplicada ao processo e as fontes de energia térmica utilizada. A (FIG. 15) ilustra um ciclo clássico do mecanismo de formação de colagem no forno rotativo de produção de clínquer.

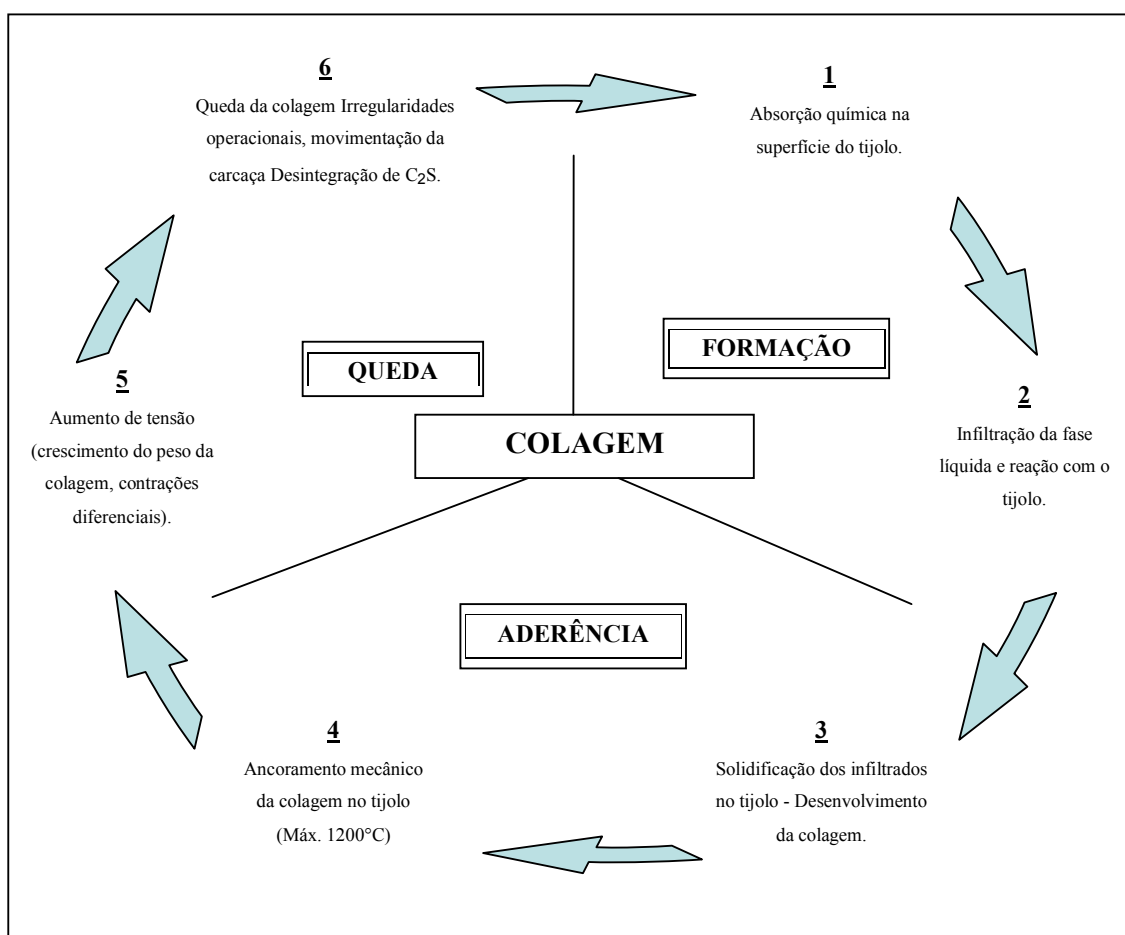


FIGURA 15 - Ciclo clássico de formação de colagem no forno rotativo de clínquer.

FONTE: Adaptada - Gontijo e Oliveira (1991)

De acordo com Marciano (1991), as causas que propiciam a formação de colagem são muitas das vezes duvidosas e controvertidas, pois nem sempre técnicos ou pesquisadores dispõem de todas as informações desejáveis para analisar o processo, desde elementos menores no cru e dos combustíveis, passando por características do cru, como finura, módulos, e etc, e condições operacionais do forno, até a análise detalhada dos produtos finais, que são as incrustações/colagens e o clínquer, com isso, por questão de praticidade, disponibilidades de tempo, custos, e etc, raramente se faz o acompanhamento de todos os parâmetros, antes, durante e depois da formação das incrustações/colagens. Mas alguns parâmetros mais claramente evidentes ou detectáveis são normalmente utilizados para otimização da formação das colagens e serão destacados a seguir.

3.5.2.1 Características químicas, físicas e mineralógicas do cru.

O clínquer é constituído por quatro óxidos principais, denominados componentes principais do cimento, que são CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , também são encontrados outros elementos oriundos de impurezas das matérias-primas ou dos combustíveis, entre esses os mais importantes são MgO , SO_3 e álcalis.

A combinação ou a reação dos componentes principais depende da relação de teores entre os mesmos, portanto a determinação da porcentagem de cada matéria-prima (calcário, argila e corretivo) depende essencialmente da composição desejada para o cimento portland.

A composição química do clínquer é o fator principal que condiciona as reações de clinquerização em seus aspectos principais como facilidade de queima objetivando clínquer de boa qualidade e a otimização da operação. Esta composição pode ser expressa por vários métodos de controle que são denominados módulos de controle da mistura crua.

3.5.2.1.1 Módulos de controle da mistura crua

Módulo de silicatos - MS

Conforme documento Lafarge Brasil (1998), o módulo de silicatos exprime uma correlação entre os componentes com elevada atividade hidráulica (C_2S e C_3S) e a fase líquida (C_3A e C_4AF). Este módulo está diretamente ligado ao processo de clinquerização do cru, influenciando na quantidade de fase fundida. A elevação do M.S implica em dificuldades na queima e cocção da farinha devido à diminuição da fase líquida. Este fato provoca um aumento na proporção de C_3S e C_2S e uma diminuição proporcional na quantidade de C_3A e C_4AF , que são responsáveis pela fase líquida, logo, resultará na diminuição da tendência de formação de colagem na zona de clinquerização.

ABCP (1984) relata que os limites estabelecidos para tal módulo são $1,2 < MS < 4,0$ e que tais características são otimizadas quando esta relação se apresenta no intervalo entre 2,4 e 2,7. O M.S é dado pela relação entre os silicatos e a soma dos aluminatos e ferros contidos nas matérias-primas e corretivos que compõem a mistura conforme a equação (1).

$$(1) \quad MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

“Se o modulo de sílica for muito alto ter-se-á um material com baixa quantidade de fase líquida, difícil de queimar e com dificuldade de interação com o tijolo. Por outro lado, um módulo muito baixo tem efeito contrário, tendo em vista que a formação de uma quantidade elevada de fase líquida pode ter o efeito de “lavagem” da colagem, expondo o tijolo à ação do meio e possibilitando uma infiltração excessiva das fases do clínquer”. (MARCIANO, 1991, p.6).

Módulo alumínio-férrico - MA

Segundo documento Lafarge Brasil (1998), este módulo relaciona o óxido de alumínio com o óxido de ferro oriundos das matérias-primas e corretivos que

compõem a mistura. O MA controla a composição e a natureza da fase líquida, fornecendo informação sobre a viscosidade e a quantidade a uma determinada temperatura, ou seja, fornece informação da extensão e duração da zona de fase fundida. Um módulo de alumina baixo torna a fase líquida menos viscosa, facilitando a cinética das reações diminuindo o consumo de combustível. Contribui também para uma melhor granulação (nodulação) do clínquer e conseqüentemente melhora o processo de formação de colagem na zona de clinquerização.

De acordo com ABCP (1984) o limite estabelecido para este módulo está compreendido em $1 < MA < 4$; sendo que tais características são otimizadas quando o clínquer apresenta valores para esta relação dentro do intervalo 1,4 e 1,6. Este Módulo é dado pela correlação de compostos aluminosos com compostos ferrosos disponíveis nas matérias-primas e nos corretivos conforme equação (2).

$$(2) \quad MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Segundo Marciano (1991), o módulo de alumina por sua vez, condiciona a viscosidade da fase líquida (quanto menor o MA, menor a viscosidade), favorecendo a queima. Para obtenção de uma colagem satisfatória, deve-se considerar que, quando da utilização de valores mais altos de MS, o MA deve ser menor. Para formação de colagem, é difícil propor valores para módulos de mistura, tendo em vista a dependência com relação à natureza do cru, às condições de queima e às características do forno.

Fator de saturação de cal - FSC

Conforme documento Lafarge Brasil (1998), este módulo quantifica a quantidade máxima de CaO que pode reagir com os outros óxidos o SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ e determina o conteúdo de C₃S do clínquer. O FSC é dado pela equação (3).

$$(3) \quad FSC = \frac{100CaO}{2,8SiO_2 + 1,1Al_2O_3 + 0,7Fe_2O_3}$$

Ainda conforme documento citado um FSC que forneça um clínquer de boa qualidade e que exija uma quantidade mínima de calor para sua queima representa a escolha de uma saturação tecnicamente adequada e economicamente viável para o processo. Um valor ideal para este fator é na faixa de 95 a 98%.

Em resumo, um FSC muito alto resulta uma farinha de queima difícil, exigindo maior consumo de combustível, dificultando a cinética das reações gerando formação de $\text{CaO}_{\text{livre}}$, o que de certa forma influencia no processo de formação e dissolução de colagens.

Fator de Colagem – AW

O fator de colagem, também chamado de fator de aptidão para crostas, é uma relação que permite comparar misturas cruas de composições químicas variadas, e avaliar a tendência à formação de colagens na zona de queima e à formação de bolas e anéis de clínquer. De acordo com Alsop P. A. (2005), a tendência de colagem – AW é dada pela equação (4):

$$(4) \quad AW = C_3A + C_4AF + 0,2C_2S + 2Fe_2O_3$$

As relações de queima se derivam de observações práticas, onde o ponto ótimo para o AW é aquele que permita a formação de uma colagem estável na zona de queima e que ao mesmo tempo não acarrete na formação dos indesejáveis anéis e bolas de clínquer.

Conforme Alsop (2005):

AW < 28: Diminui a tendência de formação de colagem.

AW > 30: Maior formação de colagem, logo valores muito acima de 30, ocasiona a formação de anéis e bolas de clínquer e “snowmen” no resfriador.

3.5.2.1.2 Outros fatores relacionados ao cru

Por se tratar da matéria-prima para utilização no processo de formação do clínquer, além dos módulos de controle da mistura crua, para Marciano (1991) outros fatores são preponderantes para controle e otimização do processo de formação de colagens, a destacar os seguintes fatores;

- Assegurar uma moagem conveniente, de forma a obter o cru nas seguintes granulometrias: Retido em $200\ \mu\text{m} < 1\%$ e em $100\ \mu\text{m} < 10\%$;
- Também durante a moagem assegurar a homogeneidade do cru;
- Evitar flutuações químicas e mineralógicas do cru;
- Evitar utilização de matérias-primas com alta proporção de álcalis, que se volatilizam a temperaturas mais baixas (ilitas, micas e feldspato);
- Evitar que a relação molar Enxofre/álcalis ultrapasse o valor de 1,2%, pois tanto o excesso de álcalis como o de enxofre contribuem para formação indesejável de colagens e anéis de clínquer;
- Evitar a utilização de cru que exceda 0.015% em cloretos;
- Evitar a baixa saturação em cal, por serem mais propensas à formação de anéis;
- Utilizar Módulos de Sílica e Alumina compatíveis, comprometendo com a qualidade da clinquerização.

3.5.2.2 Os Combustíveis

A escolha do combustível para produção do clínquer é sempre uma combinação das seguintes características: Complexidade e custos dos equipamentos, custo do Kcal/kg de clínquer, perturbações causadas pelo combustível durante o processo de cozimento e alterações da qualidade do clínquer.

Segundo documento Lafarge Brasil (1997), para que as reações de formação do clínquer aconteçam é necessário haja uma fonte de energia térmica que será capaz de aquecer a altas temperaturas o sistema. Esta fonte de energia é proveniente da combustão, ou seja, das reações químicas exotérmicas que acontecem entre o combustível e o oxigênio conduzido pelo comburente, envolvendo altas temperaturas.

Os combustíveis convencionais disponíveis no mercado sofrem muitas variações em função de sua origem, logo as regras de aplicação no processo de

combustão, devem ser adaptadas, sendo necessário que os equipamentos do processo, sejam versáteis dotados de sistemas de regulagens que possibilitam a utilização de tais combustíveis.

As restrições impostas a combustíveis estão relacionadas aos elementos tais como o cloro, o enxofre, as matérias voláteis e as cinzas.

De acordo com documento Lafarge Brasil (2002), o cloro proveniente dos combustíveis gera distúrbios ligados à volatilização, pois é um elemento que possui característica própria e não é possível controlar a volatilização pela combustão, é altamente volátil e possui uma baixa temperatura de condensação (entre 600 e 700°C). Os gases oriundos das reações e conseqüentemente o cloro, seguindo a dinâmica do processo, sobem para torre de ciclones pela força do arraste (exaustão). Neste local caracterizado por baixas temperaturas, o cloro por sua característica se condensa na forma de ácido Clorídrico e cloretos. Estas substâncias são indesejáveis ao processo, pois é causa de possíveis corrosões em ciclones, filtros de processo e armações metálicas no concreto armado, também é causa de grandes perturbações ao nível da vazão de material por promover a aparição de uma fase líquida a baixas temperaturas. Este elemento combinado com álcalis e eventualmente com a cal, forma colagens na torre de ciclones que necessitam ser removidas, evitando entupimentos sérios.

Conforme documento Lafarge Brasil (1997), o enxofre é um elemento presente nos combustíveis como óleo e coque. No geral a qualidades de tais combustíveis são classificadas em função do teor de enxofre, o que caracteriza a fundamental importância do controle deste elemento no processo. O enxofre é controlável desde que parâmetros como a relação de enxofre/ álcalis não exceda 1,2%.

As matérias voláteis são preponderantes para os combustíveis sólidos e se encontram em parte sob forma de hidrocarbonetos, que se volatizam a partir de 100°C.

As cinzas em geral são compostas de sílica, Alumínio, cálcio e ferro. É importante ressaltar que tais elementos não participam das reações de combustão, logo eles se integram ao clínquer e à colagem, sendo necessário considerá-los no momento da composição do cru.

“Os componentes químicos das cinzas dos combustíveis sólidos vão combinar com as matérias-primas e será incorporada na íntegra na estrutura do

clínquer produzido. Assim, os elementos químicos que compõem as cinzas devem ser considerados na composição do cru”. (CEMBUREAU, 1999, p. 23 tradução do autor). A TAB. 4 mostra os compostos e elementos químicos oriundos das cinzas geradas pelos combustíveis.

TABELA 4 – Componentes das cinzas de amostras de carvão mineral.

Elementos principais	SiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , CaO, MgO, P ₂ O ₅ , Na ₂ O, K ₂ O, SO ₂ e SO ₃ .
Elementos Traços	Mn, Li, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Zr, Nb, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba, Pb, As, outros.

FONTE: (MCT, 2002 *apud* Cárpio, 2005, p.67) ⁸.

O processo produtivo de cimento requer um alto consumo de energia térmica, pois as reações acontecem a altas temperaturas, com isso, para que a produção seja viável, fazem-se necessário à utilização de combustíveis de baixo custo, os chamados combustíveis alternativos ou secundários, originários do co-processamento de resíduos industriais, ressaltando que o uso destes não influencie na qualidade dos produtos finais, pois esta continua sendo um dos fatores preponderantes para manutenção do negócio. A (FIG. 16) mostra os tipos de combustíveis utilizados pela indústria cimenteira.

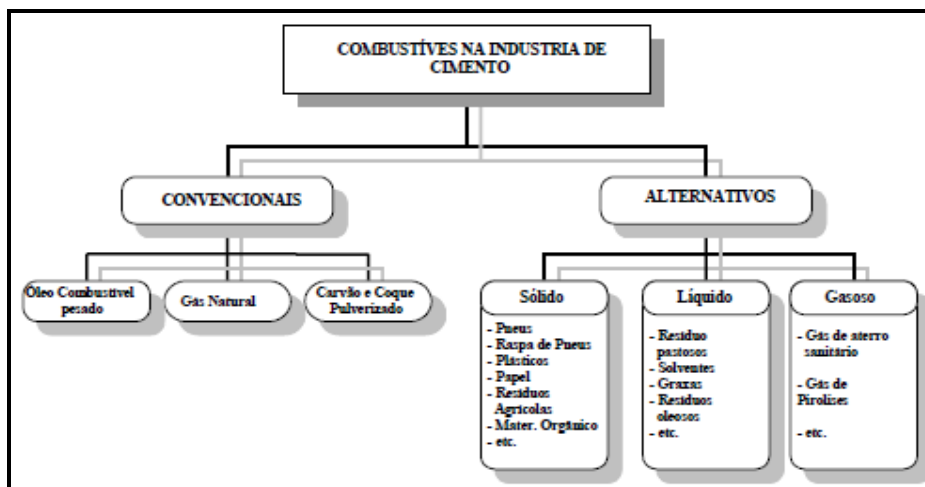


FIGURA 16 - Tipos de combustíveis utilizados atualmente pela indústria cimenteira.

FONTE: Cárpio (2005)

⁸MCT (2002). Ministério de ciência e tecnologia. Emissões fugitivas da Mineração e do Tratamento de Carvão. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Disponível em: [HTTP://www.mct.gov.br/clima/comunic-old/energia.htm](http://www.mct.gov.br/clima/comunic-old/energia.htm). Acesso em: 2 fevereiro de 2004.

3.5.2.2.1 Carvão Mineral

De acordo com a Aneel (2009), o carvão mineral é formado pela decomposição da matéria orgânica (como restos de árvores e plantas) durante milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão. É composto por átomos de carbono, oxigênio, nitrogênio, enxofre, associados a outros elementos rochosos (como arenito, siltito, folhelhos e diamictitos) e minerais, como a pirita. A extração (ou mineração) do carvão pode ser subterrânea ou a céu aberto. A opção por uma ou outra modalidade depende, basicamente, da profundidade e do tipo de solo sob o qual o minério se encontra.

“O carvão mineral é uma complexa e variada mistura de componentes orgânicos sólidos, fossilizados ao longo de milhões de anos. A sua qualidade é determinada pelo conteúdo de carbono, e este varia de acordo com o tipo e estágio dos componentes orgânicos. A turfa apresenta um baixo conteúdo carbonífero, na ordem de 45%, o linhito oferece um índice que varia de 60% a 75%, o carvão betuminoso (hulha), mais utilizado como combustível contém cerca de 75% a 85% de carbono, é considerado o mais puro dos carvões, o antracito apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90%”. (ANEEL, 2009).

O carvão mineral utilizado na indústria cimenteira são carvões pobres com alto teor de cinzas, conseqüentemente menor poder calorífico. A TAB. 5 mostra a composição típica (aproximada) do carvão mineral utilizado na indústria cimenteira.

TABELA 5 – Composição típica do carvão mineral utilizado na indústria cimenteira.

Composição Química	Teor (%)
Carbono	55 a 65 %
Hidrogênio	3 a 5%
Oxigênio	3 a 6 %
Nitrogênio	1 a 2%
Enxofre	0,5 a 4%
Cinzas	22 a 33%
Combustível	65 a 78%

FONTE: Lafarge Brasil, Cecil (2003).

Para uma melhor combustão, o carvão mineral deve ser finamente moído, onde 90 a 95% dos grãos devem ter um diâmetro inferior a 90 µm, isto para aumentar a velocidade de volatilização dos materiais voláteis, gerando uma

inflamação imediata frente à chama na direção do maçarico. Em resumo, para uma combustão satisfatória é preciso que a finura seja em função da quantidade de material volátil.

“Combustão Pulverizada: Nos processos atuais de combustão pulverizada (CP), o carvão é queimado como partículas pulverizadas, aumentando substancialmente a eficiência da combustão e da conversão. A maioria das tecnologias modernas de CP atinge 99% de eficiência na combustão”. (ANEEL, 2009).

3.5.2.2.2 Carvão Vegetal

“O carvão vegetal é produzido a partir da lenha pelo processo de carbonização. A carbonização da lenha é praticada de forma tradicional em fornos de alvenaria com ciclos de aquecimento e resfriamento que duram até vários dias. Os fornos retangulares equipados com sistemas de condensação de vapores e recuperadores de alcatrão são os mais avançados e utilizados no Brasil. Os fornos cilíndricos com pequena capacidade de produção, sem mecanização e sistemas de recuperação de alcatrão continuam sendo os mais usados nas carvoarias”. (RENÓ, 2007, P.31).

“As indústrias produtoras de carvão vegetal são responsáveis pela emissão de componentes químicos junto com os gases provenientes da carbonização. Entre os componentes químicos estão: Dióxido de Carbono, ácido acético, metanol, alcatrão” (BRITO, 1990, *apud* RENÓ, 2007, P.31).⁹

Como é o caso do carvão mineral, para que o carvão vegetal também tenha um bom desempenho na combustão, ele deve ser finamente moído, onde 90 a 95% dos grãos devem ter um diâmetro inferior a 90 µm, isto para aumentar a velocidade de volatilização dos materiais voláteis, gerando uma inflamação imediata frente à chama conforme a direção do maçarico. Em resumo, para uma combustão satisfatória é preciso que a finura seja em função da quantidade de material volátil.

O carvão vegetal também é chamado de moinha de carvão, pois no geral é originário dos processos de siderurgia, processo no qual a parte fina é considerada como resíduo de carvão, vindo a ser aproveitada no processo da indústria

⁹ BRITO, J. O. (1990), “Carvão Vegetal no Brasil: Gestões Econômicas e Ambientais”, Estudos Avançados, v.4, n. 9.

cimenteira. Este tipo de carvão é considerado pobre com alto teor de cinzas e de resíduos e conseqüentemente menor poder calorífico.

A TAB. 6 mostra aproximadamente a composição dos carvões utilizados na indústria cimenteira, ressaltando que este tipo de carvão deve ser monitorado e os elementos nele detectados e que não farão parte no processo de combustão, estes devem ser considerados no momento da composição do cru, pois os tais se integram ao clínquer e à colagem durante o processo de clínquerização.

TABELA 6 – Composição química do carvão vegetal, sendo duas amostras com resultados de Teor demonstrados em % em massa.

Composição Química		Teor (% em massa)	
		Amostra 02	Amostra 01
Densidade	g/m ³	0,3	0,3
Enxofre	(S)	N.D.	N.D.
Carbono	(C)	65,80	59,80
Hidrogênio	(H)	2,70	2,80
Nitrogênio	(N)	1,00	0,70
Cinzas (*)		13,34	19,75
Umidade Total		17,54	30,00
Materiais Voláteis(*)		30,76	29,96
Poder Calorífico Superior	(PCS)	5732 Kcal/Kg	5278 Kcal/Kg
Poder Calorífico Inferior	(PCI)	5589 Kcal/Kg	5135 Kcal/Kg

FONTE: Lafarge Brasil (2009).

3.5.2.2.3 Coque de petróleo

“O coque verde de petróleo – CVP é o produto sólido granulado carbonáceo, obtido no pré-craqueamento de óleos residuais das unidades de conversão de resíduos de petróleo, denominados de craqueamento retardado (UCR)”. (NORMA CPRH-N-1-007, 2009).

Atualmente grandes quantidades de coque de petróleo e óleos residuais pesados têm sido produzidas como subprodutos dos processos de refino de petróleo. Quando o óleo cru é refinado, as frações mais leves são retiradas, restando um óleo residual de menor valor. Em algumas refinarias, este óleo residual é processado novamente, a fim de produzir maior quantidade de produtos leves, gerando o coque de petróleo como resíduo.

“Existem três tipos de processos de coqueamento: o delayed coking, fluid coking e flexicoking. Quando a matéria-prima contém maior quantidade de resíduos

pesados, é utilizada no processo denominado delayed coking, que é responsável pela produção de aproximadamente 90% de todo coque de petróleo produzido”. (MEYERS, 1996 *apud* SALOMON, 2002, P.49).¹⁰

Para o uso como combustível em fornos de cimento, o coque é utilizado não calcinado sendo chamado de coque verde de petróleo – CVP, que de acordo com norma regulamentadora, CPRH-N-1-007, ficam fora dessas exigências, indústrias de cimento e cal para consumo de CVP maiores do que os indicados anteriormente e teores de enxofre superiores a 7,0 %, considerando que o ambiente do próprio forno é alcalino (presença de sais de cálcio e magnésio) e o SO₂ formado é absorvido no processo, transformando-se em sulfatos de cálcio e magnésio.

A TAB. 7 apresenta a composição típica (aproximada) do coque verde de petróleo utilizado pelas indústrias de cimento e cal.

TABELA 7 - Composição típica do coque verde de petróleo.

Análise Imediata %	
Carbono Fixo	84 - 97
Enxofre	0,5 - 7,5
Material Volátil	2 - 15
Hidrogênio	até 5
Cinzas	0,1 - 0,8
Metais Pesados mg/kg	
Ferro (Fe)	5,0 - 2.000
Vanádio (V)	5,0 - 5.000
Boro (B)	0,1 - 5,0
Níquel (Ni)	10 - 30.000
Propriedades	
Densidade aparente kg/m³	700 - 900
Poder Calorífico Inferior (PCI) Kcal/kg	8.200 - 8.600

FONTE: CPRH-N-1-007 (2009).

Como em todo processo, a utilização do coque como combustível tem também suas complicações. A citar a quantidade de tri óxido de enxofre que são emitidas conjuntamente com o dióxido de enxofre durante o processo de fabricação do clínquer, estes provém do resultado de reações químicas que acontecem durante

¹⁰ MEYERS, R.A. “Handbook of Petroleum Refining Process”, McGraw -Hill, 2nd Ed. 1996.

o processo de queima a partir do conteúdo de enxofre das matérias-primas e principalmente pelo processo de combustão que libera o enxofre contido nos combustíveis.

3.5.2.2.4 O Óleo combustível

“O preço do óleo combustível triplicou em termos reais entre 1979 a 1981, devido à grande dependência brasileira do petróleo importado, que tinha um preço elevado em 1979. Como consequência criou-se incentivos e subsídios a algumas fontes alternativas de combustíveis e energia térmica, através da assinatura de protocolos para a utilização do carvão mineral nacional pelas indústrias de aço, cimento, e papel e celulose”. (RENÓ, 2007, p.27).

“Até 1979, a indústria brasileira de cimento utilizava óleo combustível para suprir 92,7% de suas necessidades de energia para fins térmicos. Diante da rápida elevação do preço de petróleo em 1979, as indústrias de cimento assinaram o “Protocolo de Redução e Substituição do Consumo de Óleo Combustível na Indústria Cimenteira”, neste havia o comprometimento das indústrias cimenteiras em atingir no final de 1984, a substituição total do óleo combustível consumido nas plantas produtivas através da utilização do carvão mineral nacional e da adoção de medidas de conservação de energia”. (SANTI e SEVÁ, 1999 *apud* RENÓ, p.27 (2007)).¹¹

“Em 1980, a indústria já havia substituído aproximadamente 15% do óleo combustível consumido em 1979, e em 1985, havia substituído quase 95% do valor de referência. Além disso, as medidas de conservação de energia levaram à redução de mais de 20% no consumo específico de energia térmica no período de 1980 – 1995”. (RENÓ, 2007, p. 27).

“As medidas adotadas para reduzir o consumo de energia térmica envolveram a melhoria da preparação do cru e da moagem do clínquer; a redução das perdas de energia nos gases de exaustão do forno; a redução do excesso de ar de combustão; a redução das infiltrações de ar falso no forno; o aumento da eficiência do resfriador de clínquer pelo aproveitamento do calor sensível para pré-aquecimento do ar de combustão, com a redução das necessidades de ar primário;

¹¹ SANTI, A. M., SEVÁ, A. O. (2004), “Combustíveis e Riscos Ambientais na Fabricação de Cimento”, II Encontro Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, Campinas.

a redução das perdas de pó; e a redução das perdas por radiação e convecção”. (SANTI e SEVÁ, 1999 *apud* RENÓ, p.28 2007).

O óleo combustível tem sido muito pouco utilizado pelas indústrias de cimento. No caso da Lafarge – Arcos, o óleo combustível do tipo 2 A, é utilizado somente em condições de aquecimento inicial do forno no início de campanha e em situações de extrema emergência.

O óleo combustível é um produto derivado do petróleo, ele é originado da parte remanescente da destilação das frações do petróleo, designadas como frações pesadas, obtidas em vários processos de refino. A exemplo de muitos outros combustíveis, o óleo combustível tem sua qualidade classificada em função do seu teor de enxofre, logo sua composição depende de sua origem e dos tratamentos sofridos durante seu refino. A TAB. 8 mostra a composição típica (aproximada) do óleo combustível utilizado na indústria cimenteira.

TABELA 8 – Composição típica do óleo combustível.

Óleo TBTS*		Óleo Normal		Óleo HTS*	
Nitrogênio	1 a 2 %	Nitrogênio	1 a 2 %	Nitrogênio	1 a 2 %
Enxofre	< 0,5 %	Enxofre	0,5 a 2,5 %	Enxofre	> 2,5 %
Hidrogênio	9 a 10 %	Hidrogênio	7 a 9 %	Hidrogênio	6 a 8 %
Carbono	85 a 88 %	Carbono	85 a 88 %	Carbono	85 a 88 %
PCI	10000 Kcal/kg	PCI	9500 Kcal/kg	PCI	8500 Kcal/kg

FONTE: Lafarge Brasil, Cecil (2003).

* TBTS – Teor de enxofre muito baixo. * HTS – Alto teor de enxofre.

Conforme Lafarge Brasil, Cecil (2003), o manuseio e a utilização do óleo combustível são bastante complexos, pois devido a suas características ele deve ser mantido a certa temperatura, pois esta será fator principal para sua viscosidade. O óleo 2A tem sua viscosidade de 70°Engler a 20°C. Para utilização do óleo combustível no processo de combustão de forma que tal processo seja satisfatório, sua viscosidade deve ser inferior a 3° Engler. Com esta viscosidade e com uso de equipamentos adequados, a aplicação do óleo ao processo deve ser de forma pulverizada formando uma fina neblina facilitando que cada gota encontre oxigênio necessário para o processo de combustão e evite que grandes gotas de óleo caiam sobre o revestimento refratário, vindo a causar infiltrações e danos ao revestimento.

3.5.2.2.5 Os Combustíveis alternativos

O custo da energia é considerado significativo e decisivo no custo final do cimento Portland. No intuito de amenizá-los, vem se desenvolvendo novas técnicas tanto no uso das matérias-primas e dos combustíveis necessários, como na parte operacional, desenvolvendo equipamentos mais eficientes.

Algumas propriedades dos resíduos industriais que serão utilizados como combustíveis alternativos ou matéria-prima alternativa precisam ser analisadas, tais como: estado físico dos combustíveis (sólido, líquido, gasoso), toxicidade (compostos orgânicos e metais pesado), composição e conteúdo das cinzas, quantidade de voláteis, poder calorífico e conteúdo de umidade.

“O conhecimento dessas propriedades é importante, pois a qualidade química do combustível alternativo deve estar de acordo com as leis de proteção ambiental, o seu poder calorífico deve ser estável suficiente para permitir o controle da alimentação no forno rotativo. A sua forma física deve ser de fácil manuseio para o seu transporte a uma planta de cimento”. (Mokrzycki e Uliasz-Bochenczyk, 2003 *apud* Renó, 2007, p. 36/37).¹²

No caso específico da Lafarge, um dos principais resíduos utilizados é o pneu inservível que é consumido na região do pré-calcinador. O sistema de transporte é realizado via correias transportadoras, sendo alimentada por uma retomadora, em sistema automatizado e alocada na baía¹³. Esta baía é alimentada por outro conjunto de correias transportadoras, oriundo do galpão de resíduos. O transporte e a injeção do resíduo pelo sistema de balança dosadora, todo este processo é controlado e automatizado garantindo o consumo responsável.

As (FIG. 17a e 17b) ilustram o local onde é feita a injeção do combustível alternativo no forno, passando por um sistema de válvulas clappets, impossibilitando a entrada de ar falso durante a injeção.

¹² MOKRZYCKI, E., ULIASZ-BOCHENCZYK, A. (2003), “Alternative Fuel for the Cement Industry”, *Applied Energy*, v 74, pp 95-100. Tradução nossa.

¹³ Baía consiste em local onde é armazenado o combustível ou matéria já elaborado e prontamente a serem consumidos.

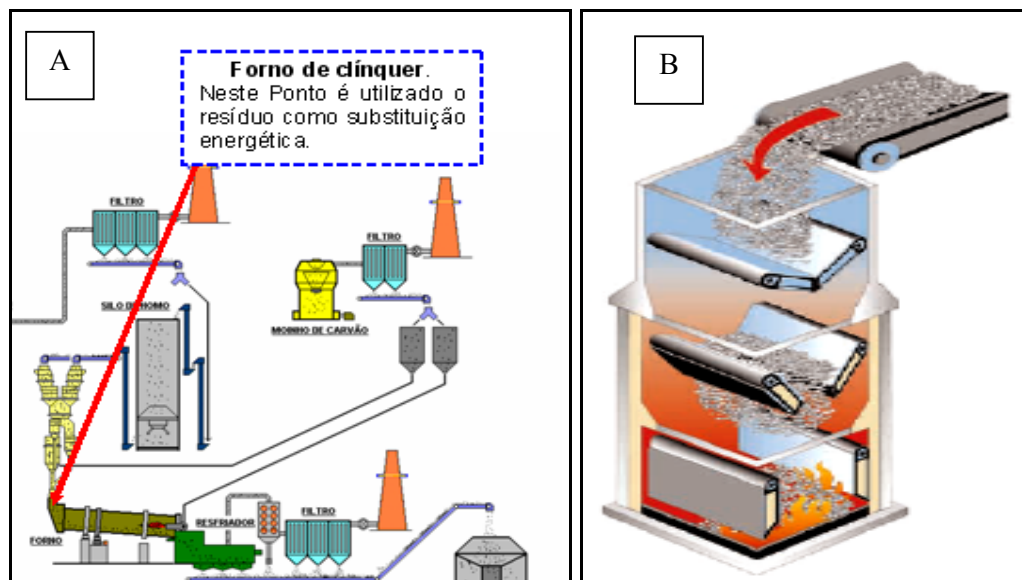


FIGURA 17a – Local onde é injetado o combustível alternativo.

FIGURA 17b – Sistema de correia transportadora e válvulas clappets para injeção de Resíduo triturado no forno.

FONTE: 17a - Lafarge Brasil (2008). 17b - Signoretti (2008).

Conforme documento Lafarge Brasil (2004), o cloro e o flúor são dois parâmetros de controle para recebimento de resíduos, sendo exigidos por lei. O teor máximo permitido para descarga é 0,4% para cloro e flúor, para assegurar que suas emissões não ultrapassem os limites de segurança ambiental e não causem distúrbios no processo originários como exemplo a condensação do cloro nas regiões mais frias do processo e corrosão de ciclones.

A dosagem do resíduo, na Lafarge, tem como vigilância constante a quantidade de farinha que alimenta o sistema do forno para clínquerização. Isto é devido à estequiometria correta para combinação dos metais presentes e à emissão dos gases, dentro dos limites permitidos, conforme rege o CONAMA 264 de 1999.

Elementos como metanol, tolueno, tetraclore de carbono, diclorobenzeno e outros, podem ser encontrados em resíduos destinados ao co-processamento na indústria cimenteira. A TAB. 9 apresenta valores referentes à composição típica destes elementos.

TABELA 9 – Composição típica de resíduos.

Elemento	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Oxigênio (%)	Cloro (%)
Metanol	37,5	12,5	50	-
Tolueno	91,3	8,7	-	-
Xileno	80,5	9,5	-	-
Diclorometano	24,2	4	-	71,7
Tetracloro de Carbono	7,7	-	-	92,3
Diclorobenzeno	48,9	2,7	-	48,2
Água	-	11,2	88,8	-
*Óleo	36	10,3	-	-

FONTE: Ottoboni (1996) adaptada.

A dosagem do resíduo, seja na substituição de matéria-prima ou na substituição térmica do combustível, deve ser bem elaborada, de forma a garantir o controle do processo e dos níveis de gases gerados na combustão, principalmente, quando esta alimentação for a pontos do sistema forno, em que não sejam de alta temperatura, conforme descrito na resolução do CONAMA 264 de 1999.

3.5.2.3 A chama

É impossível estudar a chama sem que seja entendido o processo combustão.

De acordo com Lafarge Brasil, Cecil (2003) denomina-se combustão reações químicas exotérmicas que acontecem entre o combustível e o oxigênio, que se processam liberando luz e calor. É a combustão que fornece a energia térmica necessária para que as reações químicas e físicas aconteçam no interior do forno de clínquer.

Elementos da combustão: O combustível é todo material capaz de liberar grande quantidade de energia através da combustão. O comburente é o elemento necessário para combustão sem ser o combustível, no caso comburente é o oxigênio presente no ar.

A energia térmica obtida na queima de um combustível é liberada pela reação química entre carbono, hidrogênio e enxofre, combinados no combustível, com o oxigênio do ar.

De acordo com Pinheiro e Valle (1995), para se realizar a combustão é necessário uma quantidade de ar estequiométrica, chamada de ar teórico, entretanto para assegurar a combustão completa é necessário um excesso de ar de modo a manter um teor de oxigênio até o final da chama e superar as deficiências de mistura do queimador. A rentabilidade e a uniformidade de funcionamento dos fornos de cimento dependem acentuadamente da ajustagem correta e da forma de funcionar da Combustão. Neste caso, como resultado da Combustão, obtemos a chama que deve aquecer o material a ser cozido, mas não pode desenvolver um fluxo calórico tão alto a ponto de causar danos ao forno.

A grande maioria do calor que é transferido à carga do forno dentro da zona de clinquerização é através da radiação. Esta, por sua vez, é produzida, em primeiro lugar, pelos produtos da combustão e em segundo lugar, pela energia do clínquer quente, da colagem e das incrustações na zona de queima. A (FIG. 18) representa a sessão de saída do forno, ilustrando a chama com sentido do ar e combustível, do ar secundário, dos gases e material, mostra também a zona de sinterização e a colagem.



FIGURA 18 - Representação esquemática da saída do forno e a chama.

FONTE: Lafarge Brasil (2005) adaptada.

Conforme Pinheiro e Valle (1995), a eficiência da combustão depende determinantemente do excesso de ar. Um grande excesso de ar é indesejável, por que diminui a temperatura da chama, e aumenta as perdas de calor devido à entalpia dos gases efluentes, reduzindo a eficiência térmica além de diminuir o comprimento da chama. Por outro lado, um baixo excesso de ar pode resultar em

uma combustão incompleta e na formação de CO, fuligem e fumaça, além de possibilitar a acumulação de combustível não queimado, causando risco de explosão. Logo valor ótimo do excesso de ar se dá quando estas duas influências estão em equilíbrio, ou seja, suficientemente baixo para minimizar a perda de calor, sem produzir combustão incompleta.

A chama pode produzir perturbações químicas e térmicas no processo de produção do clínquer. Dentro das perturbações químicas pode-se citar: difusão de silicatos e infiltração de silicatos e de sulfatos alcalinos, os quais possuem baixo ponto de fusão e assim migram para as zonas frias e solidificam-se provocando esforços adicionais.

Conforme documento Lafarge Brasil (1997), atmosfera localmente redutora também pode ser associada às partículas de combustível não queimado, causado quando a chama entra em contato com o talude de material (clínquer em formação) no leito do forno gerando a volatilização do enxofre e álcalis originando o chamado ciclo dos voláteis.

As mudanças na atmosfera para redutora fazem com que o ferro passe de óxido férrico (Fe_2O_3) a ferroso (FeO), ocasionando mudanças volumétricas que prejudicam a estrutura interna do tijolo.

As perturbações térmicas se referem principalmente ao superaquecimento e às mudanças bruscas na temperatura, e são devidas especialmente à operação anormal do forno. Por esta razão, o aquecimento inicial e as condições seguintes de operação desempenham um papel importante na vida útil do refratário.

As mudanças bruscas na temperatura são devidas a esfriamentos rápidos do forno, no caso de paradas, assim como, à operação instável do forno por falta de alimentação ou por controle irregular da chama.

3.5.2.3.1. Os aspectos da chama

De acordo com documento Lafarge Brasil (1997), do ponto de vista da combustão e transferência de calor, a chama ideal é a mais firme, curta, bem centrada e brilhante possível sem, no entanto, afetar a colagem ou revestimento da zona de queima. Por definição, a chama para fornos de clínquer é uma “Chama de Difusão Turbulenta”, e os aspectos que devem ser verificados são:

- Ponto de ignição do combustível;
- Direção da chama;
- Formato;
- Cor.

Dependendo dos aspectos apresentados pela chama, influências na operação do forno poderão ser observadas no tocante a economia de combustível, manutenção das colagens da zona de queima, durabilidade do revestimento refratário, qualidade do clínquer produzido e formação de colagens indesejáveis.

Ponto de ignição: É o início das reações químicas da combustão. O fator principal para ignição dos combustíveis é a atomização. Atomização é o fenômeno mecânico que visa a reduzir o combustível em pequenas partículas ou gotículas de maneira a aumentar a superfície até aproximar da fase gasosa, a fim de propiciar uma eficiente mistura com o oxigênio do ar destes combustíveis em ambientes de alta temperatura.

Deficiência no ponto de ignição dos combustíveis pode ocasionar o alongamento da chama e conseqüentemente deslocar a zona de queima. “O comprimento da chama pode ser referido como a distância entre o bico do queimador e o ponto de ignição do combustível ou onde começa e onde o processo de reação da combustão termina, ou seja, o comprimento da chama depende do ponto de ignição do combustível”. (PERAY, 1986, p. 64, tradução do autor).

Também pode ocasionar perturbações químicas, gerando uma atmosfera redutora no interior do forno causando infiltrações e volatilização de elementos químicos como o enxofre.

Direção da chama: Normalmente a chama não obedece à direção imposta pelo maçarico, com isso sofre desvios causados principalmente pelos seguintes elementos:

Ar secundário: O ar secundário proveniente do resfriador ao penetrar no interior do forno, tende a deslocar a chama para cima. Com isso para ajustar a direção da chama deve-se observar e considerar este fator. “A chama tem uma tendência de elevar-se para cima em direção ao topo do arco forno, devido ao dinamismo resultante da entrada de ar secundário desigual no forno”. (PERAY, 1986, p. 77, tradução do autor).

De acordo com documento Lafarge Brasil (1997), a temperatura e a regularidade do ar secundário têm efeitos importantes sobre a combustão. Estando o ar secundário abaixo de 800°C acontece a diminuição do processo de ignição da chama, resultando num grande aumento na distância de inflamação e em maiores riscos de sólidos não queimados caírem sobre o talude produzindo atmosfera redutora e conseqüências de volatilização.

Seção de saída do maçarico: Documento Lafarge Brasil (2001) diz que é de vital importância que os circuitos de ar e combustíveis estejam em perfeito estado para não afetar o formato e direção da chama. Outro fator muito importante e deve ser observado, é a limpeza da ponta do maçarico, pois é muito comum o acúmulo de concreções provenientes do pó contido no ar secundário. Estas concreções vão acumulando próximo aos circuitos, com isso modifica a direção e o formato da chama. A (FIG. 19) mostra em detalhe a ponta de um maçarico com seus circuitos de ar e combustível.

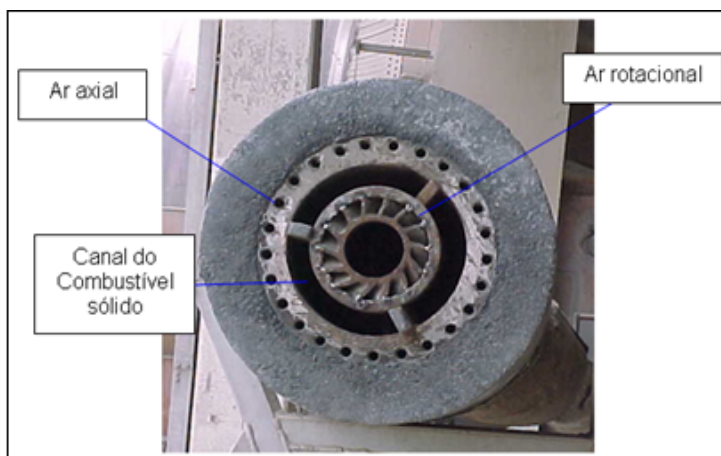


FIGURA 19 – Ponta do maçarico com circuitos de ar e combustível.

FONTE: Lafarge Brasil (2001).

Assimetria da zona de queima: Uma parte da seção transversal da zona de queima é ocupada pelo material, e isto cria uma assimetria na área livre da seção, a qual tende ser acompanhada pela chama. Admite-se que a melhor transferência de calor entre a chama e a carga de material é obtida quando a chama está ligeiramente deslocada para o material (ao ponto de não lamber ou tocar no talude de material gerando volatilização dos elementos químicos já incorporados no clínquer) ou no centro do forno.

Ajuste na Direção da Chama: Sempre que for efetuado algum ajuste no maçarico este deve ser feito gradativo e com o forno em regime normal de funcionamento. Uma vez determinada a direção ideal da chama, não se deve mudar a posição do maçarico a não ser que exista uma razão definida para tal. A (FIG. 20) representa um corte transversal do forno rotativo de clínquer com esquema de quadrantes identificados por números e letras com indicação das posições da chama em relação à assimetria do forno.

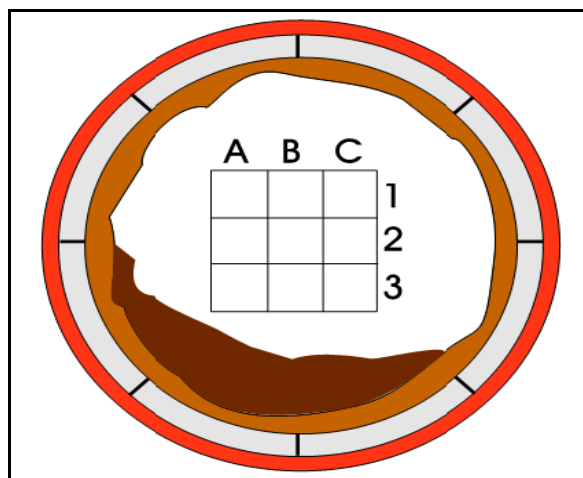


FIGURA 20 – Representação de um corte transversal do forno.

FONTE: Peray (1986)

“No contexto de posicionamento, a chama ideal deve ser bem centrada ao longo do eixo do forno. A centralização da chama é obtida pelo ajuste do maçarico em relação ao carrinho de suporte. A (FIG. 20) auxilia na identificação do ponto adequado para posicionamento da chama, considerando que a centralização é fator preponderante, neste caso os pontos mais favoráveis da seção seriam 2A ou 2B.

Logo os pontos mais indesejáveis com respeito à proteção da colagem, evitando que a chama venha causar sua dissolução devido à intensidade de calor numa mesma direção, tais pontos seriam 3C, 2C, 1C e 1B.

A posição 3A é indesejável quanto à qualidade do clínquer porque parte do combustível não queimado atinge a carga e cria, no instante de sua queima, uma atmosfera redutora localizada dificultando a formação dos compostos de clínquer e também causando a volatilização do enxofre”. (PERAY, 1986, p.78, Tradução do autor).

Formato da chama: Tanto o formato como o comprimento da chama estão bastante relacionados às suas dependências da velocidade de reações de combustão.

Alguns fatores que influenciam nestes aspectos:

- A viscosidade do óleo combustível;
- A mistura combustível / ar deve ser aquecida a uma temperatura mínima para que se inicie a combustão (temperatura de ignição). Quanto mais quente for a zona de queima e do ar secundário, mais rápida será a combustão e resultará uma chama curta;
- A granulometria e umidade dos combustíveis sólidos;
- A vazão e velocidade do ar de transporte;
- A vazão do ar axial e do rotacional (radial).

Documento Lafarge Brasil (1997) estabelece que a seção de saída do maçarico seja composta de diversos circuitos concêntricos que de fora para dentro estão:

- Circuito de ar axial: É composto por um conjunto de furos circulares que possibilitam uma boa distribuição periférica de ar. Este circuito é responsável pelo alongamento da chama.
- Circuito anelar de entrada do combustível sólido no qual também percorre o ar de transporte. Este também deve ser considerado na composição da chama.
- Circuito de ar rotacional (Radial): É composto por uma rosácea com inclinação de ângulo necessário para conceber e colocar o ar primário em rotação.

O documento ressalta que o ar de transporte do combustível, o ar axial e o rotacional (radial) são gerados por sopradores de alta potência e eficiência, o que possibilita que sejam efetuados ajustes na vazão de ar necessário para a composição do formato da chama.

Documento Lafarge Brasil (1997) define que a chama é caracterizada por cálculos de dois grandes parâmetros, a impulsão e o swirl. Estes dois parâmetros são elementos de controle do ar axial e rotacional que são originários de estudos teóricos e envolvem variáveis físicas como; vazão mássica de ar, velocidade do ar, massa volumétrica, potência térmica do forno e etc.

Ainda conforme documento citado, por definição, impulsão é a quantidade de movimento axial produzido pelo ar primário e swirl é razão entre o momento rotacional e o momento axial do ar primário. Uma vez calculados valores para estes parâmetros, muitas das vezes não constituem cenário no qual os objetivos foram alcançados, mas constituem valores guia, que permitem caminhar na direção correta para a otimização da combustão.

Para concluir é importante observar que a impulsão e swirl, efetivam grandes influências sobre a chama, sendo quanto mais alta a impulsão mais curta e mais quente será a chama e quanto maior o swirl, maior será o diâmetro da chama.

A FIG. 21 demonstra a ponta do maçarico com seus vários circuitos e o direcionamento que estes circuitos dão ao ar primário necessário para compor o formato da chama e promover as reações da combustão.

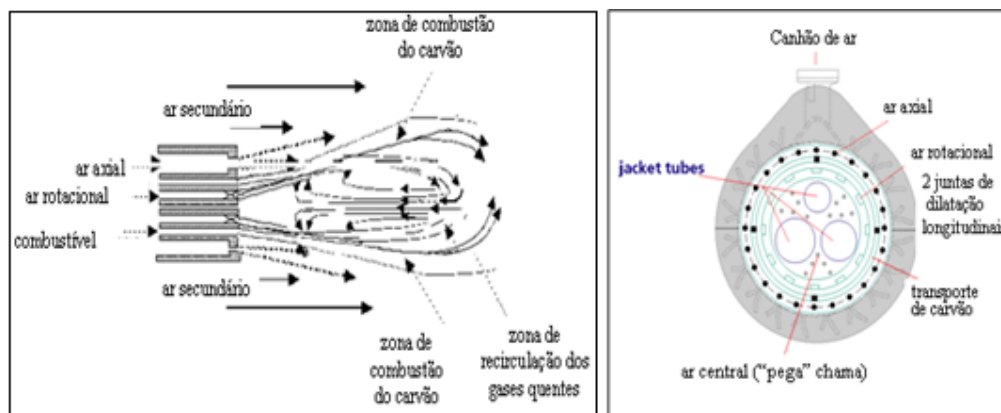


FIGURA 21 – Ponta do Maçarico com direcionamento de ar para composição do formato da chama.

FONTE: Lafarge Brasil (2001).

- **Cor da Chama:** Através de observações comparativas é possível correlacionar a cor com a temperatura da Chama. A busca pela chama ideal leva a considerar que o ideal é que ela seja a mais brilhante possível, isto observado a olho nu e por pessoa experiente. Podemos associar a característica cor com a temperatura da chama de acordo com a (TAB. 10). (PERAY, 1986, p.82, tradução do autor).

TABELA 10 – Relação entre cor e temperatura da chama.

Cor da Chama	Temperatura da chama
Vermelho quase imperceptível	475°C
Vermelho visível a vermelho escuro	475°C a 650°C
Vermelho escuro a vermelho cereja	650°C a 750°C
Vermelho cereja a vermelho cereja brilhante	750°C a 825°C
Vermelho cereja brilhante a laranja	825°C a 900°C
Laranja a amarelo	900°C a 1090°C
Amarelo a amarelo claro	1090°C a 1320°C
Amarelo claro a branco	1320°C a 1540°C
Branco a branco ofuscante	Acima de 1540°C

FONTE: PERAY, 1986, p 82, tradução do autor.

Atualmente já é possível contar com equipamentos tecnologicamente avançados, como câmeras raytec, quadtek e scanner, que fazem leitura instantânea da temperatura interna e externa do forno de clínquer, contribuindo com a identificação de distúrbios relacionados à combustão e conseqüentemente evitando a dissolução das colagens na zona de clinquerização e aumentando a vida útil dos elementos refratários.

3.5.2.4 O revestimento refratário

De acordo com documento Lafarge (2001), o termo refratário é atribuído a um grupo de materiais, em sua maioria cerâmicas, capazes de suportar altas temperaturas sem perder suas propriedades físico-químicas, entre elas, resistência, baixa condutividade térmica e condutividade elétrica. São materiais cerâmicos capazes de suportar elevadas temperaturas e também esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperaturas e outras situações. Cada situação utiliza um produto compatível com os requisitos de cada processo, variando em medidas e uso para diferentes temperaturas.

O refratário é um material não metálico que tem capacidade de resistir à altas temperaturas. Um material cerâmico pode ser classificado como refratário, desde que não ocorra sua deformação ou fusão a uma temperatura inferior a 1500 °C.

Documento Lafarge Brasil (2001) mostra que os refratários devem apresentar as seguintes características:

- O refratário deve ter uma boa resistência química, térmica e mecânica e estabilidade volumétrica na faixa de temperatura de processo.
- O refratário deve possuir características químicas que auxiliem a formação de colagem, ou seja, na região para zona de clinquerização, por exemplo, o refratário deve interagir quimicamente com a colagem.
- Como a estabilidade volumétrica depende da temperatura, a variação de volume é a definição do limite de aplicação de um refratário.
- É denominado refratário todo material com limite de aplicação ou refratariedade mínima.

No contexto da fabricação o revestimento refratário tem uma importância considerável tendo em vista as implicações econômicas inerentes, seja por perda de

calor que acarreta no aumento no consumo específico de energia térmica, como no lucro cessante advindo de parada do forno para troca do revestimento.

De acordo com Marciano (1991), tendo em vista a compatibilização dos interesses econômicos e técnicos. O refratário deve atender a dois pré-requisitos essenciais, que é a durabilidade e a retenção de calor. Uma eventual parada de forno para troca de revestimento refratário implica na perda irreversível de produção. Além disso, as perdas de calor pelas paredes do forno podem ser expressivas, dependendo das características, da espessura residual do tijolo e de sua aptidão para reter a colagem.

Conforme Gontijo e Oliveira (1991), uma vez que a durabilidade e a condutividade estão diretamente ligadas a custos elevados de produção, especificar adequadamente os refratários para fornos de clínquer é uma tarefa que sempre deve ser executada em conjunto entre representantes dos proprietários do forno e acessória técnica do fornecedor dos refratários. A razão para isto é compreensível uma vez que cada forno em particular opera com um gradiente termoquímico distinto sendo em função de variáveis como:

- Tipo e projeto do forno;
- Especificação do clínquer produzido;
- Tecnologia de combustão adotada;
- Filosofia operacional praticada;
- Tipos de matérias-primas utilizadas na composição do cru.

Gontijo e Oliveira (1991) avaliam também, que o controle adequado do consumo específico dos refratários estabelece padrões que permitem correlacionar e quantificar em termos de custo/benefício o desempenho dos refratários as variáveis abaixo relacionadas devem ser padronizadas de acordo com:

- As flutuações dos parâmetros de controle do cru e do clínquer;
- A estabilidade da colagem;
- A manutenção mecânica e elétrica do forno, bem como o plano de manutenção preventiva;
- O ritmo operacional;
- A qualidade intrínseca dos refratários;
- Fatores de origem local ou sazonal.

De acordo com autores supracitados, se tratando de fornos novos, a avaliação do desgaste do revestimento refratário após a primeira campanha deve

ser criteriosa, pois é a partir daí que é possível criar um banco de dados com informações sobre desgastes, infiltrações, acúmulo de colagens, e etc. Fazendo este mapeamento, é possível identificar como e onde ocorrem as principais reações e conhecer as seguintes etapas:

- O campo de reações entre fases sólidas (reações com temperaturas inferiores à de clinquerização);
- O campo das reações com presença de fase líquida (clinquerização);
- Os limites e zonas de interação entre estes campos;
- As regiões expostas à ação mecânica devido à carga circulante ou ao próprio equipamento em si.

Baseado em dados coletados em diversas campanhas, foi possível estabelecer um mapeamento para o forno da Lafarge – Arcos. O mapeamento do forno rotativo representado pela (FIG. 22), correlaciona cada metro (de 0 a 56 m) com o tipo de refratário requerido em função do tipo e aplicação. Vale ressaltar que este mapeamento pode variar em função da evolução dos elementos refratários, dos tipos de combustíveis utilizados, do tipo de maçarico utilizado na combustão, do tipo de matéria-prima utilizada para fabricação de clínquer, e outros. Por isso a cada campanha deve ser feito uma nova avaliação para coleta de dados e caso necessário modificar a estruturação do perfil dos refratários.

Representação do corpo do forno rotativo (0 a 56 metro).

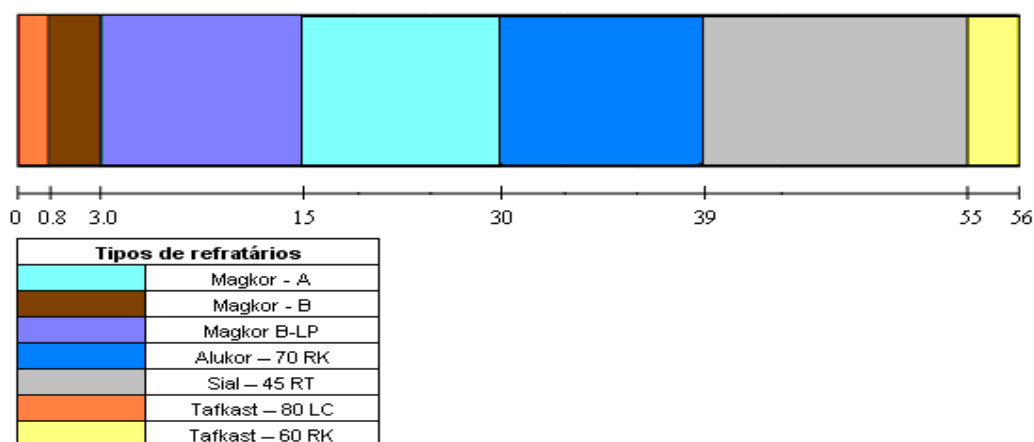


FIGURA 22 – Mapeamento do forno com perfil de refratários.

FONTE – Lafarge Brasil (2009) adaptada.

Na TAB. 11 são relacionados os tipos de tijolos refratários, algumas características e seus campos de aplicação. Os valores indicados são valores médios obtidos em laboratório que tem suas normas baseadas segundo as especificações da ABNT e de acordo com ensaios que foram realizados em uma elaboração normalizada nos laboratórios internos da Magnesita S.A. Os valores dos testes mostrados são valores padrões típicos e não se pode considerar como uma especificação. Tais dados foram obtidos em de folhas de dados de produto e de uma publicação da Magnesita S.A de outubro de 96. A empresa citada é uma das maiores fabricantes de produtos refratários para a indústria de cimento, cal e de aço do país.

TABELA 11 – Tipos e características básicas dos tijolos refratários.

Produto	Matéria-prima Básica em %	Componente principal em %	Campos típicos de aplicação
Magkor - A	Magnésio	MgO – 79,0 / 83,0 Al ₂ O ₃ - 13,0 / 16,0	Zona de transição superior e de clinquerização. Com colagem instável ou sem colagem. Condições severas.
Magkor - B	Magnésio	MgO – 83,00 / 87,00 Al ₂ O ₃ – 11,5 / 14,5	Condições severas. Zona de transição superior, inferior e de clinquerização.
Magkor B-LP	Magnésio	MgO – 83,0 / 87,00 Al ₂ O ₃ – 10,5 / 14,5	Casos especiais de colagem estável. Zona de transição inferior.
Magnefor	Magnésia sinterizada e cromita	MgO – 79,5 / 83,5 Al ₂ O ₃ – Máx. 7,0 Cr ₂ O ₃ 4,0 / 5,5	Zona de clinquerização e de transição.
Alukor – 70 RK	Aluminoso	Al ₂ O ₃ – 68,0 / 72,0 SiO ₂ – Max. 24,2	Zona de transição, cabeçote do forno, resfriador.
Sial – 45 RT	Sílico-Aluminoso	SiO ₂ – 46,0 / 50,0 Al ₂ O ₃ – 44,0 / 47,0	Locais sujeitos a variações constantes de temperatura.
Tafkast – 80 LC	Concreto aluminoso, baixo teor de cimento, Tixotrópico.	Al ₂ O ₃ – 81,0 / 86,0 SiO ₂ – 12,0 / 16,0	Áreas sujeitas à abrasão intensa e ataque de álcalis. Anel da saída do forno (Nose Ring)
Tafkast – 60 RK	Aluminoso	SiO ₂ - Max. 34,0 Al ₂ O ₃ – 54,0 / 60,0	Anéis de descarga, parede do resfriador e caixa de fumaça, cabeçote. Locais sujeitos a abrasão.

FONTE: Magnesita S.A (1996 e 1998) adaptada.

Como pode ser observado na TAB. 11 que a utilização de certo tipo de refratário em determinada parte do forno dependerá das condições químicas e físicas às quais o mesmo ficará submetido, e tais condições podem variar em função das variáveis de processo.

3.5.2.5 As condições operacionais

As condições de operação são vitais para a formação da colagem assim como todos os outros fatores mencionados anteriormente. Embora os refratários da zona de queima necessitem de reposições de tempo em tempo, as condições de operação do forno, entretanto, podem aumentar (e, infelizmente, diminuir também) a vida dos refratários. Essas condições são responsáveis pela formação e manutenção da colagem na zona de queima. A colagem é formada durante a queima do clínquer sob influência da temperatura, do material em processo e do tipo de refratário, sendo sua formação desejável tanto do ponto de vista técnico quanto econômico.

Experiências práticas na indústria cimenteira levam a supor que as características do comportamento da colagem são os parâmetros importantes para a operação contínua do forno. A vida útil do revestimento de refratários é substancialmente maior quando se consegue obter uma colagem estável ao longo da zona de queima.

“Considera-se que o forno seja operado com temperaturas que variam de um extremo a outro, ou seja, que o forno possa estar frio, normal ou superaquecido, que a temperatura de solidificação seja 1315°C e que 24% dos sólidos se fundem formando uma fase líquida neste ponto do forno, sob condições ideais de operação.

Primeiramente, considere o forno frio na (FIG 23a). Neste caso o forno não está quente o suficiente para a formação adequada da colagem e quase nenhuma colagem é formada.

A temperatura da superfície da colagem assim como a temperatura do material é baixa para produzir a quantidade necessária de matéria líquida que formaria a colagem. Este exemplo também suporta um fato amplamente conhecido, que nenhuma nova colagem pode ser formada enquanto o forno está frio.

No forno normal (FIG. 23b), a fase líquida está presente para formar uma boa colagem a temperaturas normais de operação. A temperatura da colagem,

quando a mesma emerge do material do leito, assim como, quando está em contato com o material, é inferior à temperatura de solidificação das partículas do material. As partículas aderirão à parede e se solidificarão, e continuarão esse processo enquanto a temperatura da superfície da colagem for menor que a temperatura de solidificação (1315°C). Quando a parede atingir esta temperatura nenhuma nova colagem se formará. A colagem estará em equilíbrio.

No forno quente (FIG. 23c), por causa da temperatura extremamente alta do material e da colagem, muito líquido é formado. Como todas as temperaturas estão acima da temperatura de solidificação, a colagem se transforma do estado sólido para o líquido novamente, o que implica no seu desprendimento. É desnecessário dizer que esta condição é extremamente prejudicial ao forno e ao refratário”. (PERAY, 1986, p. 149 e 150, tradução do autor).

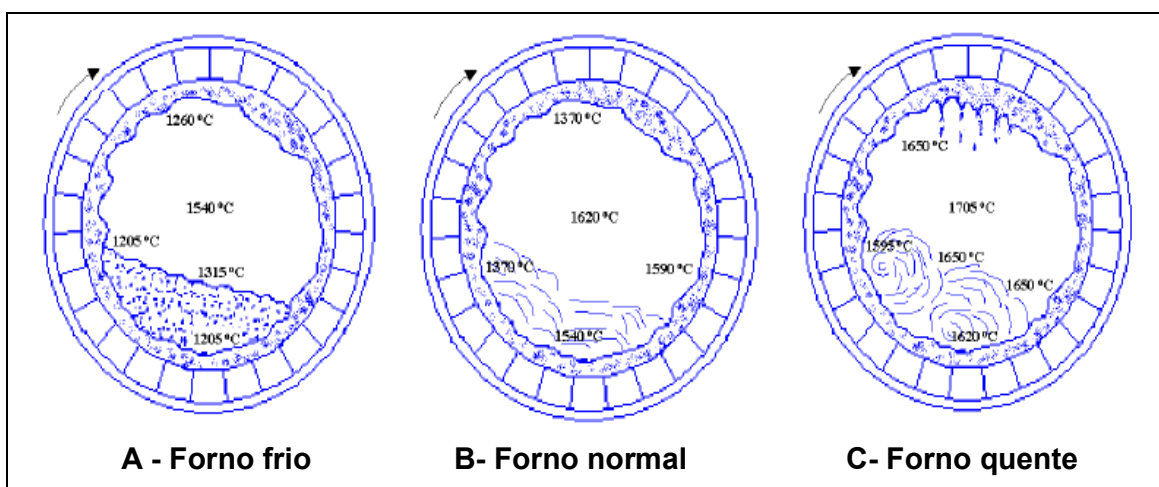


FIGURA 23 – Representação do estado do forno – forno frio, normal e quente.

FONTE: Peray (1986)

Segundo Marciano (2001), os fatores mencionados estão intimamente relacionados à estabilidade da colagem, que é determinante na campanha do revestimento refratário na zona de queima, tendo em vista que a cada queda de colagem, expõe-se o tijolo a um choque térmico significativo, à ação direta dos gases e da chama, além do que a queda da colagem promove o desprendimento de um pedaço do tijolo com a qual havia interagido.

De acordo com documento Lafarge (2005), os princípios operacionais do processo de produção do clínquer em especial o forno rotativo, requer uma visão em longo prazo de ações o que auxilia na tomada de decisão, propiciando uma

operação estável, sem operações cíclicas que são prejudiciais para formação e acarretam na dissolução ou queda da colagem. Os princípios operacionais fundamentados numa visão em longo prazo se baseiam nas seguintes características do processo:

-Na referência do teor de cozimento do clínquer: A densidade é referência da qualidade do cozimento e não da qualidade do clínquer, pois para cada composição adequada do cru, existe um valor ideal de densidade e que garante a qualidade requerida do clínquer.

-Na Combustão: O nível de oxigênio ideal e constante a longo prazo objetivando uma combustão oxidante, e evitando combustão redutora que significa baixa eficiência energética, prejuízo para a qualidade do clínquer, instabilidades no processo e perda de produção por formação de anéis devido ao aumento de volatilização. Níveis elevados de oxigênio também são prejudiciais ao processo, pois causa resfriamento e perda de energia térmica.

-Talude de material: A quantidade de material no leito do forno formando um talude constante, melhora a qualidade das trocas térmicas e contribui para operações estáveis.

- Na produção com consumo específico constante: Consumo específico é a quantidade de energia térmica necessária para produzir uma determinada quantidade de clínquer. Aumento de produção no forno requer aumento de combustível para manter o consumo específico e a qualidade do clínquer.

- No incremento de produção com reserva de tiragem: Aumentar a produção significa aumento no consumo de combustível, aumentar o consumo de combustível requer aumento de tiragem (aumento na rotação do exaustor), então sem reserva de tiragem as solicitações anteriores não serão atendidas.

- Prioridade dada à taxa de alimentação: Para operação estável, antes de tomar qualquer decisão, é necessário questionar: O que posso fazer antes de diminuir a alimentação? – É possível aumentar a alimentação?

Ainda conforme documento Lafarge Brasil (2005), no processo de produção de clínquer existem muitas variáveis de processo e várias combinações entre elas. Mas existem três condições variáveis básicas de primeira importância, chamadas de ponto “chave” para uma operação estável do forno rotativo, que são:

- Temperatura da zona de queima que tem influência predominante na qualidade do clínquer;

- Temperatura de entrada do forno: controla a estabilidade da operação;
- Percentagem de oxigênio nos gases de saída do forno: esta regula as condições da combustão e o consumo calorífico.

Com exceção de casos e condições altamente instáveis ou emergenciais, é possível ter uma estabilidade de processo mantendo o controle e a combinação destas variáveis básicas do processo.

Em resumo documento Lafarge Brasil (2005) diz que com condições operacionais estáveis é possível governar a formação e remoção da colagem na zona de clínquerização acompanhando a temperatura da carcaça e com ações necessárias, observando as condições que são favoráveis para manutenção da colagem, que são:

- Mistura crua com elevada porcentagem de líquido na temperatura de clínquerização;
- Temperatura ótima na zona de clínquerização, evitando operações cíclicas, com forno excessivamente quente ou frio;
- Bom posicionamento da chama (centro do forno ou ligeiramente deslocado para o talude de clínquer);
- Utilização de chama curta, compensando a tendência de chama longa do carvão;
- Operar o sistema de secagem e moagem de carvão de forma a queimar no maçarico carvão com umidade e finura dentro das especificações;
- Adequação da rotação do forno para a condição ideal de estabilização da colagem. Como exemplo uma condição de 3 RPM o forno não trabalha com temperatura excessivamente alta na colagem, favorecendo a manutenção da crosta e também quando está sob o talude de material, sua temperatura não diminui ao ponto de conduzir a menores variações térmicas, já na condição de 1,5 RPM, o tempo de exposição da crosta à radiação da chama é maior, atingindo temperaturas muito altas causando maior seu derretimento.
- Utilizar de forma responsável os combustíveis secundários garantindo a estabilidade da colagem.
- Outro aspecto importante é quando o forno é posto em funcionamento sem ter uma proteção (colagem). A duração mínima do aquecimento (curva de aquecimento) é determinada pelos tipos dos tijolos refratários instalados. Geralmente, são observadas as especificações sobre aquecimento recomendadas pelos fabricantes do material.

3.5.3 Os Anéis e a formação de colagens na caixa de fumaça.

Como já citado anteriormente, de acordo com Marciano (1991), as colagens podem ocorrer internamente no forno, constituindo os chamados “Anéis” quando muito espessas, ou externamente ao forno, nos vários estágios dos pré-aquecedores, na torre de ascensão, nas pás do exaustor, etc. Em todas essas situações apresentam caráter prejudicial ao processo, pois podem impor limitações ao fluxo normal do cru, do clínquer ou dos gases.

3.5.3.1 Anéis de boca

De acordo com documento Lafarge Brasil (2002) estes são os anéis que se formam na descarga do forno. Sua formação está relacionada com quatro fatores básicos:

- Posicionamento do Maçarico.

O maçarico principal define a temperatura em que o clínquer alcança a descarga do forno e a tendência a agregar-se.

- Retorno de pó do resfriador:

A espessura da camada de clínquer no leito do resfriador, a ventilação adequada e a área de sucção definem o arrastamento de partículas finas de clínquer e a possibilidade deste pó retornar ao forno. Algumas misturas cruas (cru com módulo de sílica elevado) originam clínquer mais pulverulentos, aumentando o retorno de pó do resfriador.

- Revestimento da descarga:

O tipo de revestimento na descarga do forno pode favorecer ou evitar a formação de anéis de boca.

- Segregação de fase líquida:

Esta segregação pode levar uma fração ainda líquida na boca do forno que recebendo os finos do resfriador ocorre aglutinação formando o anel. O excesso de fase líquida pode ser corrigido com ajustes na composição do cru.

3.5.3.2 Anéis de clínquer

Documento Lafarge Brasil (2002) relata que os anéis que se formam após a chama, são denominados anéis de clínquer. A ocorrência deste anel é menor em fornos de grande diâmetro por falta de apoio mecânico, este tende a crescer irregularmente e desaba antes de chegar a constituir um problema sério. As principais causas para aparecimento dos anéis são:

- Combustão ou distribuição de calor deficiente ao longo do forno;
- Operação irregular com sucessivos superaquecimentos e esfriamentos na zona de queima. E temperatura elevadas por longos períodos.
- Composição do cru propicia a apresentar elevada porcentagem de fase líquida na temperatura de clinquerização.

Os anéis de clínquer influenciam no nível de produção do forno pelo estrangulamento da tiragem e na durabilidade do refratário. A turbulência dos gases, motivada pela presença do anel, acelera a troca térmica entre os gases e o refratário, além de causar o estancamento de material gerando maior atrito em o material e o refratário. Como ações preventivas a formação de anéis é possível atuar na eliminação das possíveis causas conforme descrito anteriormente.

3.5.3.3 Anéis de sulfato

Conforme documento Lafarge Brasil (2002), estes são anéis que se formam na região média do forno, numa zona de baixa temperatura, tendo seu crescimento acelerado pela irradiação térmica na coroa de acionamento do forno ou pela primeira aliança. A formação deste anel está diretamente ligada ao balanço desproporcional da relação Enxofre/Álcalis e também pela posição da chama, que pode causar a volatilização do enxofre conforme citado anteriormente. A eliminação deste tipo de anel ocorre no geral por fraturamento pela ação mecânica de seu próprio peso.

Ações preventivas para a não formação deste anel é no posicionamento ideal da chama, trabalhar com forno estável sem atmosferas redutoras, pois tais contribuem para cinética das reações de elementos com o enxofre e na escolha de combustíveis com baixo teor de enxofre. Quando as outras restrições não estão controladas, o oxigênio deve ser adaptado para limitar a volatilização do sulfato de cálcio que já está incorporado no clínquer.

3.5.3.4 A colagem na torre de ciclones (caixa de fumaça).

Segundo Marciano (1991), as colagens que aderem nas paredes da caixa de fumaça, dutos de ciclones são extremamente indesejáveis, pois impõem limitações ao fluxo de material que desce por gravidade pela torre de pré-aquecimento. Os minerais presentes nestas incrustações possuem via de regra alta capacidade aglutinante, facilitando a aderência. Os minerais encontrados em amostras de colagens são: Anidrita (CaSO_4), o silico sulfato de cálcio ($2\text{Ca}_2\text{SiO}_4\text{CaSO}_4$), a Cal livre (CaO), a Calcita (CaCO_3) e Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF).

Conforme o autor supracitado, a composição mineralógica permite uma melhor apreciação do problema, podendo restringir as causas mais prováveis e devendo estas ser encaradas como enfoque adicional na análise do problema.

A análise da composição mineralógica da colagem indica uma grande presença de enxofre em sua mineralogia. “Compostos de enxofre podem entrar no sistema quer com os combustíveis ou com as matérias-primas naturais. Compostos de enxofre nas matérias-primas estão presentes, principalmente, como sulfatos (para exemplo, o sulfato de cálcio – CaSO_4) ou como sulfuretos (pirita ou marcasite - FeS_2). Os Sulfatos são termicamente estáveis até temperaturas de 1200°C , e irá, portanto, entrar na zona de sinterização do forno rotativo onde são decompostos para a produção de SO_2 . Parte do SO_2 combina com álcalis e será incorporada na estrutura do clínquer. A parte restante de SO_2 é transportada de volta para as zonas mais frias do sistema forno (na torre de ciclones/Caixa de fumaça) e reage com o óxido de cálcio ou com cálcio carbonato que será reintroduzido à zona de sinterização novamente”. (CEMBUREAU, 1999, p. 53 e 54, tradução do autor).

TABELA 12 – Reações químicas com a presença de enxofre.

Reações com presença de Enxofre	
$\text{Na}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$	$\rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4$
$\text{K}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$	$\rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4$
$\text{CaO} + \text{SO}_2$	$\rightarrow \text{CaSO}_3$
$\text{CaCO}_3 + \text{SO}_2$	$\rightarrow \text{CaSO}_3 + \text{CO}_2$
$\text{CaSO}_3 + \frac{1}{2}\text{O}_2$	$\rightarrow \text{CaSO}_4$

FONTE: CEMBUREAU (1999).

“As reações químicas com compostos orgânicos e inorgânicos de enxofre introduzido com os combustíveis estarão sujeitas para o mesmo ciclo interno composto de decomposição térmica, oxidação de SO₂ e reação com álcalis ou com óxido de cálcio. Com este ciclo fechado interno, todo o enxofre, que introduzido pelos combustíveis ou matérias-primas através de sulfatos, vai sair do forno quimicamente incorporado em clínquer, e não dará origem a emissões de gases SO₂”. (CEMBUREAU, 1999, p. 54, tradução do autor).

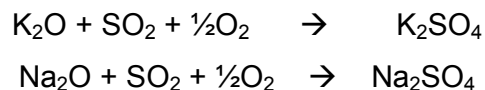
“Com a entrada excessiva de elementos voláteis, a instalação de um sistema “by pass” pode se tornar necessário a fim de extrair parte dos elementos que circulam no sistema. Este “by pass” elimina a poeira que normalmente é altamente enriquecida em álcalis, enxofre ou cloretos. Em seguida, esta poeira coletada pode ser devolvida para o processo, reintroduzindo-a ao forno rotativo, quer por via alimentar ou - mais frequentemente - insuflando na zona de combustão do forno. No processo fornos via seco, a poeira é geralmente reintroduzida juntamente com as matérias-primas, ou parte dela é alimentada diretamente ao moinho de cimento”. (CEMBUREAU, 1999, p.55, tradução do autor).

As reações acima citadas que originam no processo a partir do uso de combustíveis e matérias-primas, são fatores que ocasionam a formação de colagens/incrustações na torre de ciclones e anéis de sulfato, isto é evidenciado por um ciclo de elementos e reações químicas, chamada de ciclo dos voláteis.

De acordo com documento Lafarge Brasil (2002), a fórmula para controle da relação enxofre/ álcalis, correlaciona o enxofre com os álcalis, que no geral são provenientes do cru, que também são chamados de elementos menores, que são: Na₂O, K₂O e Cl. Equação (5).

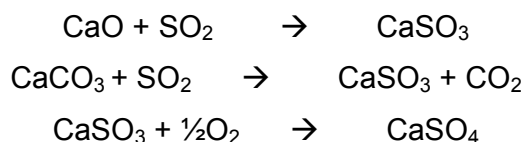
$$(5) \quad 0,8 < \frac{\frac{\%SO_3}{80}}{\frac{\%Na_2O}{62} + \frac{\%K_2O}{94} - \frac{Cl}{71}} < 1,2$$

O enxofre natural dos combustíveis, e conseqüentemente liberado pelas reações de combustão se oxidam gerando SO₂ e irá combinar com os álcalis de acordo com as reações de combinação abaixo:



Ainda conforme documento supracitado há ressalva de que as reações acima citadas obtendo tais elementos - chamados de sais alcalinos - são de extrema importância, pois incorporam na estrutura cristalina do clínquer conferindo ao cimento atributos de qualidade como a resistência à esforços mecânicos a curto prazo (resistência de um dia). Para isso esta relação prioritariamente deve estar dentro dos limites de controle ($0,8 < S/\text{Álcalis} < 1,2$), pois estando a relação menor que 0,8 as reações não se concluirão, comprometendo a qualidade do cimento.

Quando a relação Enxofre/Álcalis é $> 1,2\%$, acontece reação com a cal (CaO), formando Sulfato de Cálcio que é mais instável sob temperatura e a atmosfera de cozimento que os outros sais.



As reações evidenciam a formação do sulfato de cálcio no processo, tal composto possui característica aglutinante, que adere às paredes da caixa de fumaça e, além disso, por ser instável à temperatura formação de CaSO_4 volatiliza a 1000°C em atmosfera redutora e volatiliza também a 1450°C em atmosfera oxidante, com isso ao chegar à região de clínquerização onde a temperatura é de aproximadamente 1450°C , este composto volatiliza e o SO_2 é integrado novamente ao ciclo dos voláteis conforme (FIG. 24), que representa na forma gráfica as situações de volatilização. O ciclo dos voláteis também está representado pela (FIG. 25) que esquematiza o forno com torre de pré-aquecimento.

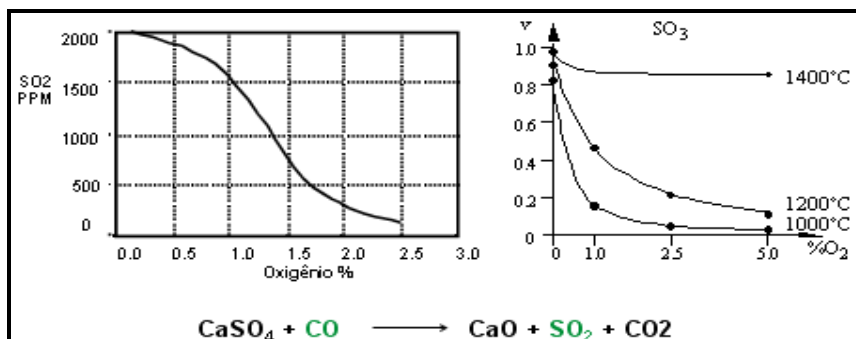


FIGURA 24 – Representação gráfica da volatilização em função de atmosfera redutora/oxidante e da temperatura

FONTE: Lafarge Brasil (2002).

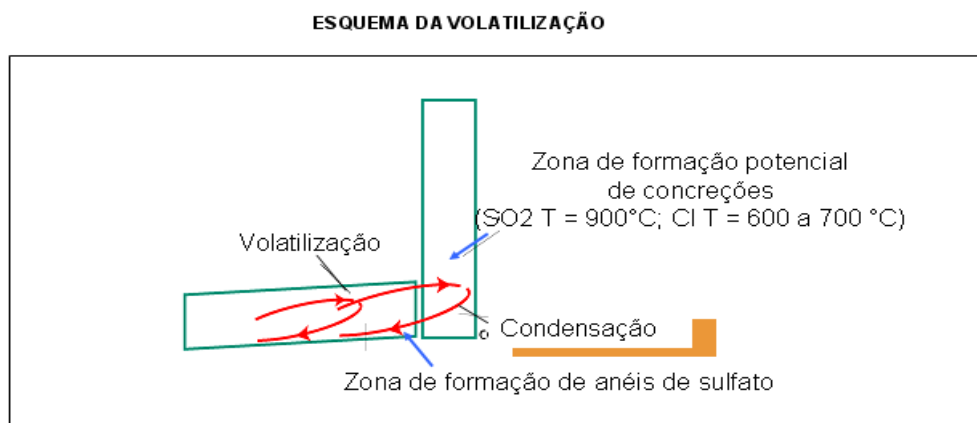


FIGURA 25 – Esquema da volatilização – Ciclo dos voláteis.

FONTE: Lafarge Brasil (2002).

As condições operacionais também são relevantes, pois uma atmosfera redutora com emissão de CO, contribui para a cinética das reações supracitadas.

De acordo com Cárpio (2005), dependendo da temperatura, do nível de excesso de oxigênio, do nível de álcalis e de cloro, da presença de monóxido de carbono e de outros elementos menores, a formação de enxofre, pode sofrer grandes variações. A formação do enxofre no processo de produção de clínquer também é determinada por considerações termodinâmicas e por reações da cinética química.

4 METODOLOGIA

Este trabalho foi conduzido de forma a obter informações através da pesquisa participativa, com foco em leituras de documentações, relatórios, fotografia das áreas pertinentes ao trabalho e um estudo dos controles que já são realizados durante processo produtivo.

As informações obtidas foram dispostas em comparação com o referencial bibliográfico, que foi colhido através de livros, dissertação de mestrados, trabalhos disponibilizados na Internet, sites confiáveis e documentações disponibilizadas pela empresa Lafarge Brasil.

O foco do trabalho está objetivamente direcionado para processo produtivo de cimento Portland, sendo realizado de acordo com as seguintes etapas: Pesquisa sobre a história, as características, as propriedades, a qualidade e o processo de fabricação do cimento Portland. E como objeto principal de estudo, a análise dos mecanismos da formação de colagem no processo produtivo de clínquer.

4.1 Contextualização da empresa

A Lafarge está localizada na região Sudeste, com uma unidade estrategicamente instalada em Minas Gerais, na cidade de Arcos, centro-oeste do Estado, devido à grande facilidade de obtenção de sua principal matéria-prima, o calcário. Trata-se de uma multinacional em sociedade anônima, sediada em Lion, na França. Está presente em 76 países, com mais de 90.000 funcionários, tendo em seu portfólio de negócios a produção e comercialização de cimento Portland, concretos, telhas e outros. A Lafarge é líder mundial em produção de cimento e agregados e terceira na produção de concreto e gesso.

A sua história foi iniciada, em 1833, por Le Teil, na Vila do Sul, na França, em sua pequena fábrica de cal, onde a família Lafarge já se dedicava a fomentar os conceitos empresariais, que se tornariam padrão, no século seguinte: priorizar a qualidade de seu produto como foco principal em todo o processo de produção.

Décadas foram necessárias para que o alto desempenho do produto de Le Teil chegasse a ser conhecido fora da França, de onde a marca Lafarge se expandiu em busca de novos nichos de mercado. Aquisições estratégicas, na França e em

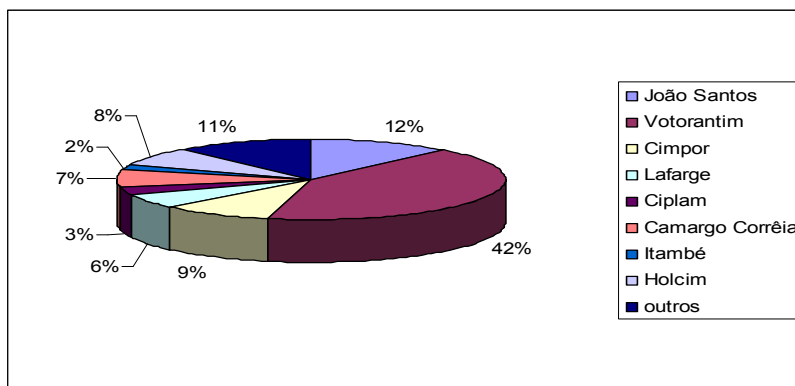
todo mundo, permitiram que, em meados do século XX, a Lafarge passasse a ocupar uma posição de liderança no mercado mundial.

No Brasil a Lafarge conta com cinco unidades produtoras, sendo três em Minas Gerais - incluindo a unidade recentemente adquirida da Cimento Davi S/A de Santa Luzia - uma em São Paulo e outra no Rio de Janeiro.

O início das atividades no país foi no dia 17 de dezembro de 1959, por meio da Cia. de Mineração de Cimento (COMINCI), em Matozinhos (MG). O grupo atua no Brasil somente na região Sudeste, o que faz a empresa ocupar o 6º lugar na posição nacional em cimentos e concretos. De acordo com Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento – SNIC, a Lafarge e seus principais concorrentes respondem pela produção nacional de cimento, estão relacionados abaixo e representados no GRAF. 1.

- Grupo Votorantin, que detém 42% do mercado;
- Grupo João Santos com 12%;
- Cimento Cimpor com 9%;
- Grupo Holcim com 8%;
- Empresas Camargo Correia com 7%;
- Grupo Lafarge com 6%;
- Ciplan com 3%;
- Itambé com 2%;
- Outros 11%.

GRÁFICO 1 – Representação em percentual da participação das empresas produtoras de cimento no mercado nacional.



FONTE: SNIC (2007).

No âmbito mundial, de acordo com site Lafarge (2009), é a primeira em cimento e agregados e a terceira em concreto e gesso (placas) o que a torna numa empresa sólida no mercado onde atua, tendo como filosofia intrínseca, respeitar crenças e valores de cada região presente.

4.2 Conceito de pesquisa

Para Gil (2002), a pesquisa é um procedimento lógico que tem como objetivo obter resposta a um determinado problema e/ou efetuar a ordem das informações, para que este venha ter a resposta, mediante aos conhecimentos científicos e técnicas de aplicação que envolve várias fases ao longo de seu processo de realização. Estas fases vão desde a formulação do problema até forma de apresentação dos resultados.

4.3 Pesquisa bibliográfica

De acordo com Gil (2002), a pesquisa bibliográfica está presente em quase todos os tipos de estudos. Embora, em maioria, exija-se este método de pesquisa, existem trabalhos com fonte exclusiva de pesquisa bibliográfica. Há dois tipos de livros para pesquisa, sendo os de referência, em que são citados por ele “dicionários, enciclopédias, anuários e almanaques” e os de referência remissiva, que são uma lista de ordem do assunto específico da pesquisa em questão, se espalhando por todo o mundo.

4.4 Pesquisa documental

Segundo Gil (2002), a pesquisa documental assemelha-se muito com a pesquisa bibliográfica, a diferença essencial entre ambas está na natureza das fontes de pesquisa. Na pesquisa documental, a fonte pesquisada se encontra em documentos, que estão dispersos em vários locais e que ainda não teve tratamento analítico. Estes não estão dispostos em bibliotecas e podem estar em igrejas, sindicatos, fotografias, memorandos, regulamentos, ofícios e instituições privadas, sendo este último uma das fontes de pesquisa deste presente trabalho.

Ainda conforme Gil (2002), a vantagem desta pesquisa é a estabilidade e a rica fonte de informações que está nela contida. Outra vantagem é quanto ao custo em comparação com os outros tipos de pesquisa, uma vez que este tipo de trabalho despense apenas de disponibilidade de tempo para ser realizado. A desvantagem deste tipo de pesquisa é quanto à crítica sobre a subjetividade e não representatividade quanto ao assunto em questão. Para que seja evitado este acontecimento, o pesquisador deverá conter vasta experiência em pesquisa e/ou enorme domínio dos assuntos a serem descritos.

4.5 Pesquisa participante

Para VERGARA (2003), a pesquisa participante é quando o pesquisador, além de efetuar a pesquisa, também está envolvido no problema a ser investigado. Entende-se, por isto, quando o pesquisador diz que efetuou a pesquisa participante, que esta, em algum momento ou integralmente, está inserida no contexto da investigação. Exemplo: pesquisa realizada por colaborador de uma indústria, que esteja ligado diretamente em seu quadro de funcionários.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de analisar as reações que se processam no sistema de forno da indústria de cimento com respeito à formação e dissolução da colagem na zona de clínquerização e a formação de colagem na caixa de fumaça, procurou-se obter a maior quantidade de informações possíveis com o objetivo de identificar e caracterizar seus comportamentos no processo de produção do clínquer.

Através de análise das informações, fica evidente que a formação da colagem na zona de clínquerização é de extrema importância, pois a vida útil do refratário é totalmente dependente desta camada protetora, pois ela impede o atrito do material com refratário. Além deste fator, é preponderante ressaltar o caráter transferência de calor devido perda de energia térmica pela parede.

5.1 Monitoramento da colagem no forno rotativo

Mediante a importância da manutenção da colagem no forno de clínquer, é necessário que sejam estabelecidos critérios para o monitoramento da formação e dissolução da colagem. Se tratando de um processo que trabalha a altas temperaturas, é impossível o acesso ao interior do forno para mensurar a espessura da colagem no corpo do forno rotativo.

Como já citado anteriormente, por trabalhar a temperaturas elevadas o forno rotativo é revestido por uma camada de elementos refratários, que tem por função proteger a carcaça metálica e reduzir a perda de energia térmica, isto devido à característica de refratariedade e baixa condutividade térmica. Porém somente estas características não são suficientes, pois além da perda de energia térmica, o consumo destes elementos devido desgastes causados pela fricção (atrito) com o material em processo e outros fatores, tornariam o processo inviável. Dentre estes se faz necessário que haja a formação e a manutenção da colagem.

O processo de produção de clínquer é composto por muitas variáveis, sendo necessário o monitoramento constante de tais. A variável que avalia as condições da colagem e dos elementos refratários do forno de clínquer, na Lafarge é obtida por um equipamento chamado Scanner.

O princípio de funcionamento do Scanner baseia-se numa medição que aplica a técnica da termografia infravermelha, que consiste em tornar visível a

radiação térmica emitida por diferentes pontos de uma superfície. O Scanner é colocado a uma distância de aproximadamente 25 metros do forno que faz o monitoramento da temperatura externa da carcaça do forno e disponibiliza ao operador resultados instantâneos e em tempo real, para que sejam feitas avaliações das condições operacionais do processo. Os resultados do monitoramento são dispostos na forma gráfica e estão dispostas na (FIG. 26).

A representação gráfica na forma de linhas demonstra a temperatura máxima, média e mínima *versus* a metragem do forno rotativo, considerando também que o forno está em movimento rotacional. A representação gráfica na forma de área demonstra o cilindro na forma 0 a 360°, isto devido ao movimento rotacional do forno. Por meio de intensidade de cores (legenda), mostra a temperatura *versus* metragem do forno rotativo. Neste monitoramento, às 04h00min horas, o perfil térmico da carcaça forno encontrava-se numa situação de conforto, caracterizando uma boa formação de colagem, com pouca transferência de calor pela carcaça, onde a temperatura máxima é de 257°C.

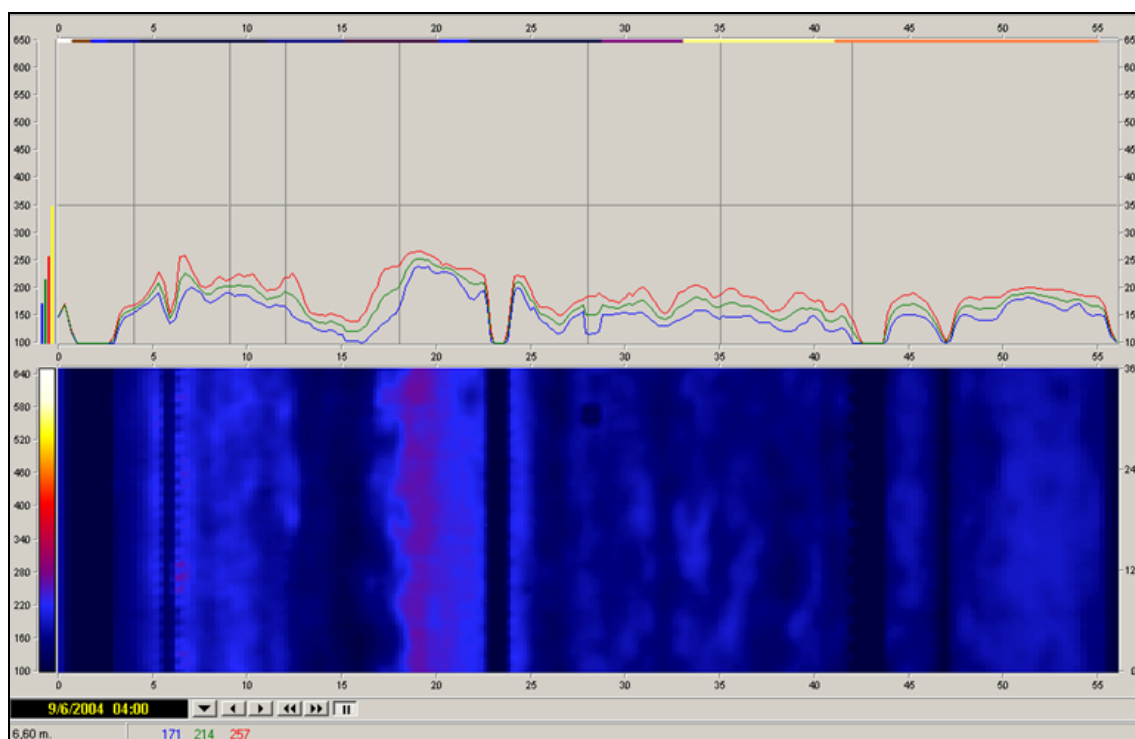


FIGURA 26 – Representação gráfica da temperatura da carcaça do forno registrada pelo monitoramento do Scanner às 04h00min.

FONTE: Lafarge Brasil (2004)

A (FIG. 27) mostra outro monitoramento captado pelo Scanner, às 22h00min horas do dia 09, caracterizando uma situação chamada de zona de alarme, onde a elevação da temperatura da carcaça evidencia que houve a dissolução/queda de colagem em parte do interior do forno rotativo, sendo a região 6,72 metro em relação à saída do forno a mais afetada, onde a temperatura da carcaça atingiu 352°C, valor este acima o limite máximo que é 350°C. Este fato é extremamente prejudicial, ao revestimento refratário e ao processo, devido à perda de energia térmica.

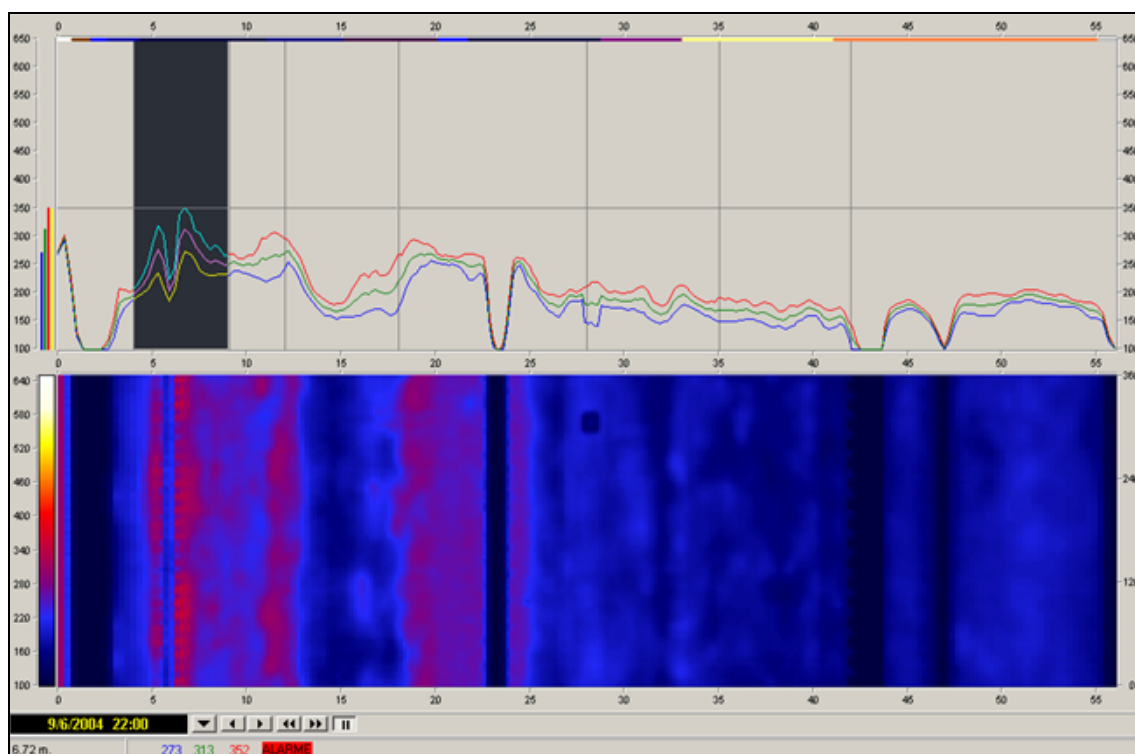


FIGURA 27 - Representação gráfica da temperatura da carcaça do forno registrada pelo monitoramento do Scanner às 22h00min.

FONTE: Lafarge Brasil (2004).

A análise da representação gráfica caracteriza a importância da formação da colagem na zona de clínquerização. Além da perda de energia térmica pelas paredes e desgaste do elemento refratário, representando custos elevados ao processo, em especial, na região 6 metro do forno é onde está localizada uma das bases de rolamento do forno (aliança), sendo que um superaquecimento nesta região pode causar sérios danos à carcaça do forno, podendo ocorrer torções,

afundamento e ovalização da carcaça. Tais danos são irreversíveis e comprometem a eficiência do equipamento.

Outro fator passível de ressalva, é que a falta da colagem também expõe o tijolo refratário a solicitações térmicas e mecânicas e propicia a infiltração de elementos originários das reações de clínquerização e de sais alcalinos. A localização externa onde ocorreu a elevação da temperatura está demonstrada na (FIG. 28).



FIGURA 28 - Forno rotativo – em destaque a base de rolamento (aliança).

FONTE: Lafarge Brasil (2004).

5.2 A dissolução da Colagem

Quando ocorre a dissolução/queda da colagem, o primeiro passo é levantar os fatores que propiciaram a dissolução/queda desta colagem. Com uma análise detalhada das variáveis de processo foi possível identificar que por fatores diversos o forno trabalhou superaquecido, sendo o superaquecimento forno a causa principal da queda de colagem. Os Fatores que condicionaram o superaquecimento do forno são:

Saturação da farinha.

Como citado anteriormente, um FSC que forneça um clínquer de boa qualidade e que exija uma quantidade mínima de calor para sua queima, representa a escolha de uma saturação tecnicamente adequada e economicamente viável para o processo. FSC muito alto resulta uma farinha de queima difícil, exigindo maior consumo de combustível, dificultando a cinética das reações gerando formação de CaO_{livre} . No caso estudado, o FSC estava abaixo do esperado como demonstra a (FIG. 29) que representa graficamente os resultados analíticos da farinha da alimentação. Este desvio na qualidade da farinha foi causado por distúrbios na dosagem de argila (diferença de fluxo Pedido X Real), ocasionado por incrustações nas laterais da balança dosadora de argila. Os distúrbios no processo foram maximizados quando houve parada no moinho de cru, diminuindo o nível do silo de cru e gerando maiores flutuações na qualidade da farinha, fato que é extremamente relevante para dissolução de colagens.

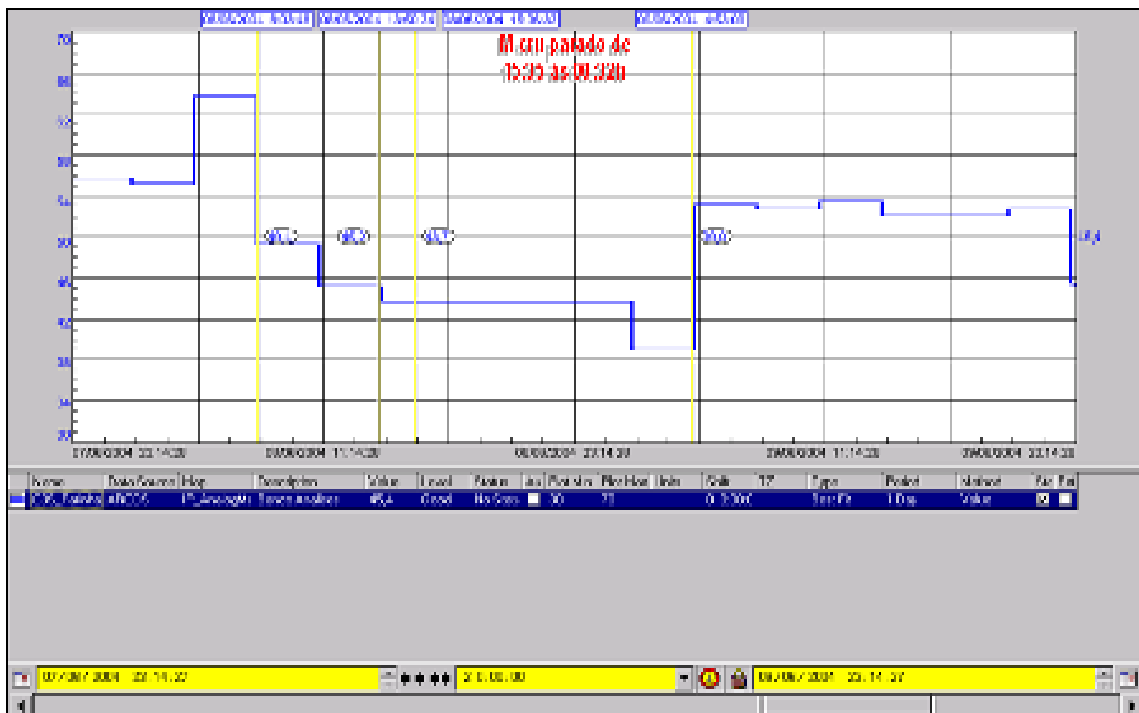


FIGURA 29 – Representação gráfica de resultados analíticos da farinha.

FONTE: Lafarge Brasil (2004).

Excesso de calor na zona de queima.

Este excesso de calor é comum, pois um baixo fator de saturação propicia à farinha uma alta aptidão à queima. Este excesso de calor é representado na forma gráfica pela (FIG. 30), que demonstra o comportamento dos resultados analíticos do NOx.

Uma das variáveis que indicam superaquecimento na zona de queima é a emissão do NOx que ocorre devido às altas temperaturas envolvidas na queima ou etapas de formação do clínquer com a contribuição de atmosfera oxidante do forno. Em resumo a temperatura gasosa, o formato da chama, a taxa de excesso de ar e o tempo de permanência do gás e do material na zona de queima em alta temperatura, contribuem na emissão deste gás.

Os resultados do NOx de campanhas anteriores que foram avaliados, não ultrapassavam valores maiores que 1500 ppm, porém no fato estudado, os valores de NOx chegaram a patamares de 1900 ppm, caracterizando o superaquecimento.

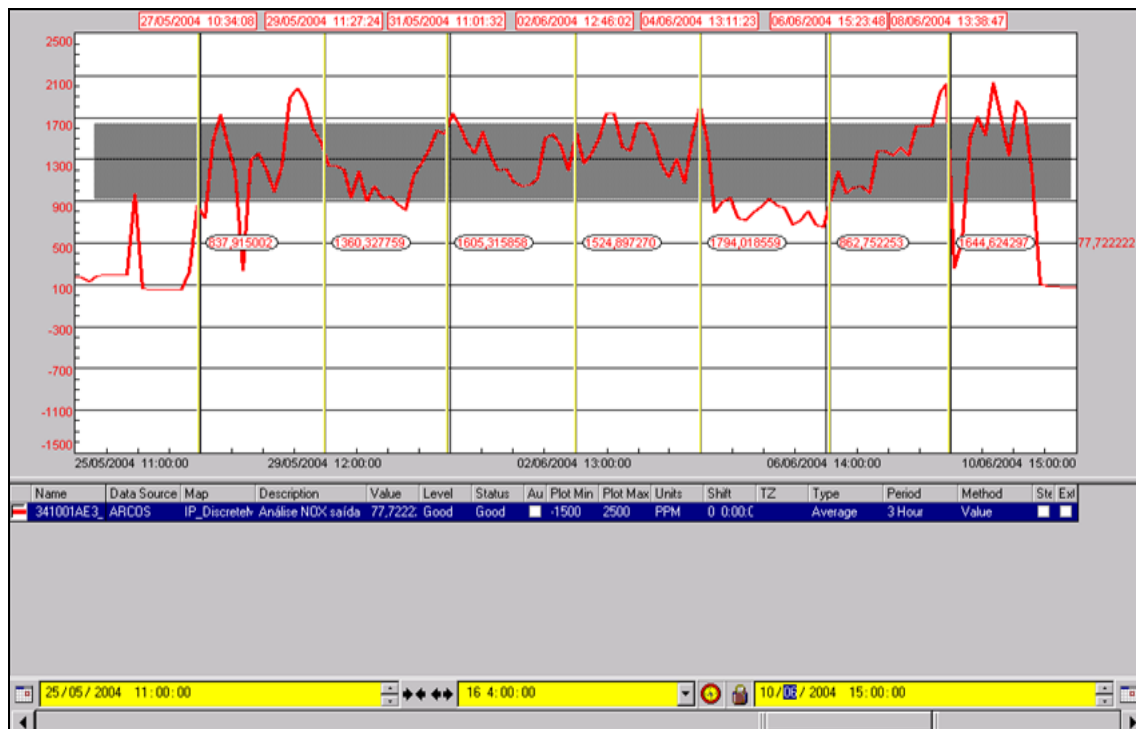


FIGURA 30 – Representação gráfica de resultados analíticos de NOx.

FONTE: Lafarge Brasil (2004)

Operação cíclica do forno.

Mediante a análise de dados do processo, é possível citar fatores que propiciaram a operação cíclica do forno, tais como:

- Os vários distúrbios na qualidade da farinha.
- O baixo nível no silo de homo (baixo estoque) causado por paradas no moinho de cru, levando a se trabalhar com alimentação de farinha reduzida (baixa produtividade), tornando o forno mais vulnerável a oscilações.
- A alimentação de farinha sendo controlada pelo by pass (controlador de vazão com menor sensibilidade), pois o dosador principal estava com problemas mecânicos.

A (FIG. 31) representa na forma gráfica as principais variáveis de acompanhamento operacional do processo. Em destaque pode citar a variável torque do forno (linha de cor verde) e a análise do NOx (linha de cor azul claro). Essas duas variáveis representam o estado do forno, destacando que às 13h43min o torque apresentava valor de 21,6% e NOx 684,69 ppm. A análise gráfica mostra que às 16h31min as mesmas variáveis apresentavam valores 69,2% e 2113,83 ppm respectivamente. A variação destes valores demonstram que às 13h43min o forno estava frio e às 16h31min o forno estava bastante quente, caracterizando uma operação cíclica do equipamento.

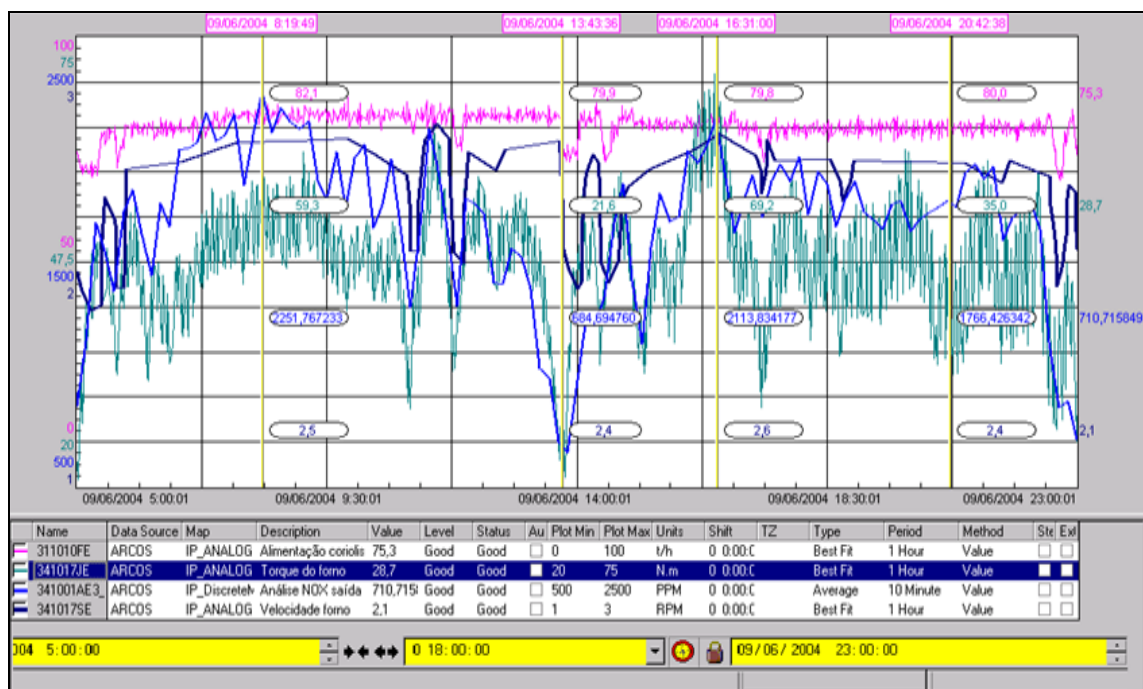


FIGURA 31 – Representação gráfica das variáveis de processo.

FONTE: Lafarge Brasil (2004).

5.3 Ações tomadas

Na obtenção do cru.

Várias medidas foram tomadas a fim de evitar flutuações na qualidade da farinha, tais como, ajustes em sensores, calibrações em equipamentos inclusive balanças dosadoras, e outros. A realização dos ajustes minimizou o nível de vibração do moinho facilitando o controle operacional e estabilizou todo sistema de moagem e conseqüentemente foi possível obter um cru quimicamente estável com menores desvios nos valores de FSC.

Ajustes no maçarico principal

Foram realizados vários ajustes no maçarico principal como demonstram a (TAB. 13). Tais ajustes alteraram o ponto de ignição, a direção, o formato e a temperatura da chama. O principal objetivo desta ação foi a obtenção de uma chama ideal que contribuísse com o processo de formação e manutenção da colagem na zona de clinquerização, e que não fosse excessivamente quente ao ponto de emitir o NOx elevado. As ações propiciaram a proteção dos elementos refratários, menor custo de produção (menor perda de energia térmica) e clínquer de boa qualidade.

TABELA 13 – Ajustes no equipamento – Obtenção de chama ideal.

Data	Rotação Radial e Axial %	Posição do Maçarico mm	Temperatura °C
15/6/2004	37 e 80	Faceando nose ring	410
16/6/2004	48 e 82	Faceando nose ring	420
16/6/2004	80 e 70	280 mm para dentro do forno	350
17/6/2004	80 e 70	280 mm para dentro do forno	350

FONTE: Lafarge Brasil (2004).

Outras ações

Um procedimento que auxilia a formação de colagem é a instalação de ventiladores para fazer o resfriamento da carcaça e conseqüentemente do refratário. Este resfriamento favorece a solidificação e aderência do material líquido no

revestimento refratário. A (FIG. 32) mostra os ventiladores instalados na região onde o superaquecimento foi mais evidente.



FIGURA 32 – Ventiladores instalados.

FONTE: Lafarge Brasil (2004).

Devido à constatação de altas temperaturas nas regiões destacadas, foi tomada decisão de parar as atividades produtivas para realizar a substituição do revestimento refratário que em função das intempéries já estava desgastados. A (FIG. 33) mostra o monitoramento da temperatura da carcaça dias após a parada para troca do revestimento refratário e de implementar as ações descritas anteriormente. Nota-se que na região onde foi substituído o refratário, há uma incidência de alta temperatura, pois no momento do monitoramento ainda não havia acontecido à formação da camada de colagem.

Já a (FIG. 34) mostra um monitoramento 24 horas depois do monitoramento destacado pela (FIG. 33), e em função da baixa temperatura da carcaça caracteriza uma formação de colagem em toda região onde era constatada incidência de alta temperatura. Após avaliação ficou evidente que as ações tomadas deram resultados satisfatórios para formação e manutenção da colagem no forno rotativo.

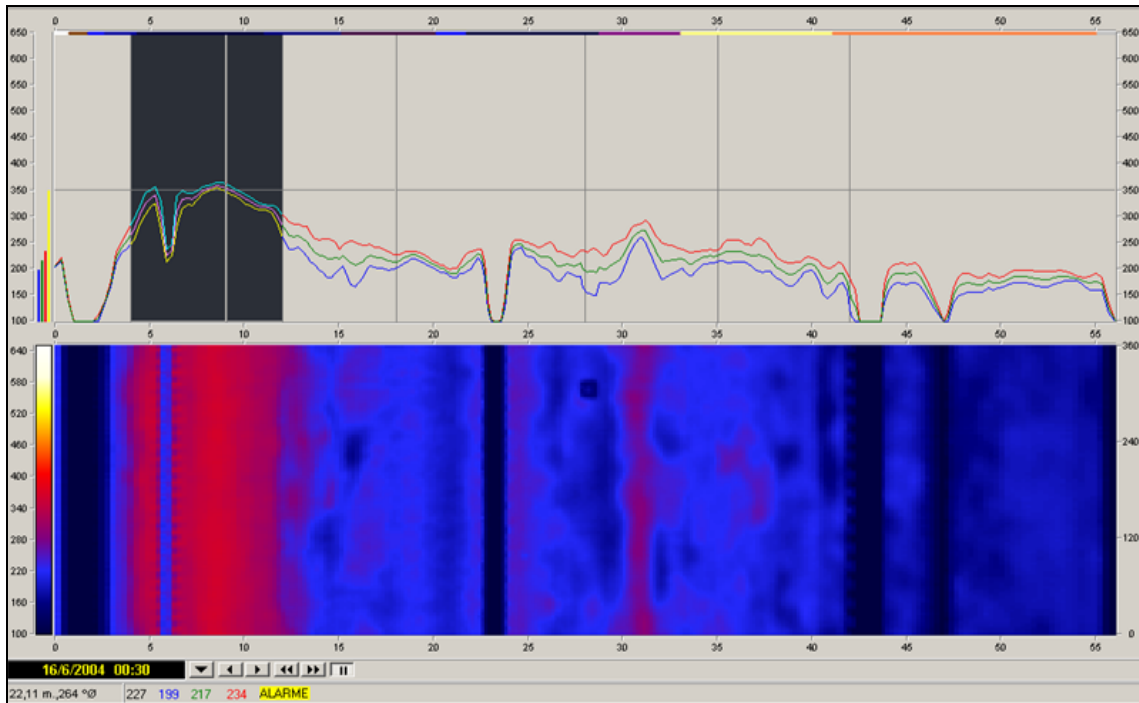


FIGURA 33 - Representação gráfica da temperatura da carcaça do forno registrada pelo monitoramento do Scanner antes da formação de colagem.

FONTE: Lafarge Brasil (2004).

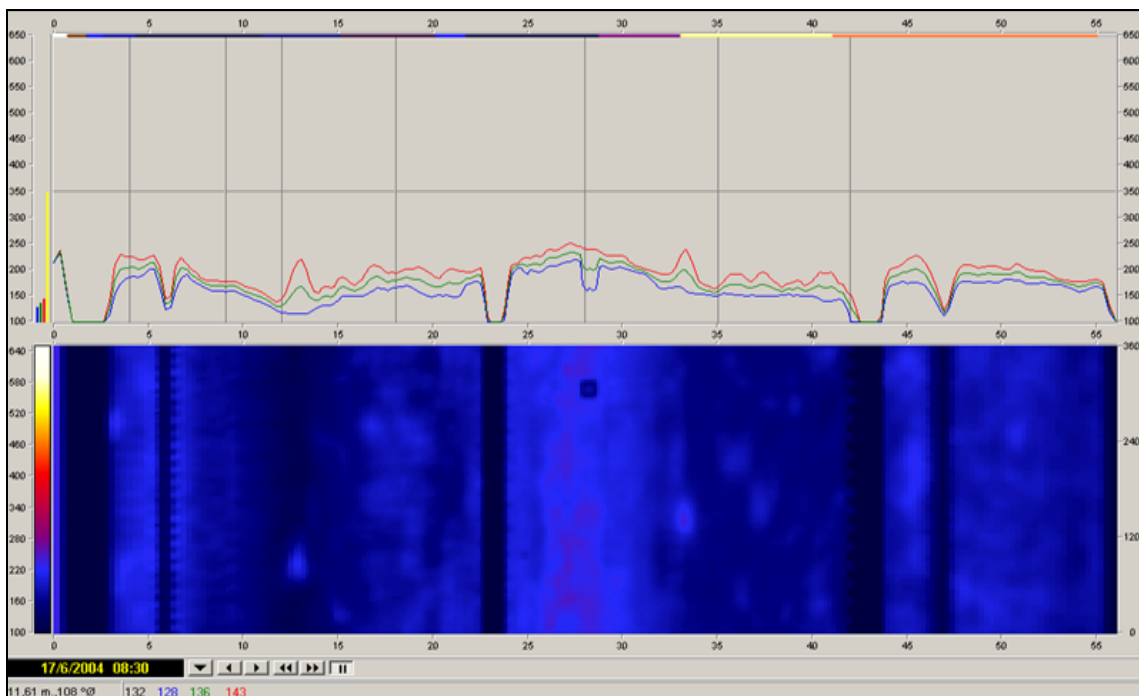


FIGURA 34 - Representação gráfica da temperatura da carcaça do forno registrada pelo monitoramento do Scanner após a formação de colagem.

FONTE: Lafarge Brasil (2004).

Dados recentes demonstram um caso de superaquecimento da carcaça por falta de colagem, detectado pela equipe da Lafarge. O princípio de consequências e causas é semelhante aos descritos anteriormente, porém a carcaça do forno apresentou maior temperatura e a região afetada é diferente se comparados ao da situação mencionada na sessão anterior. A temperatura máxima detectada pelo Scanner foi de 368°C na região 2,89 metros em relação á descarga do forno como mostra o monitoramento do Scanner da (FIG. 35).

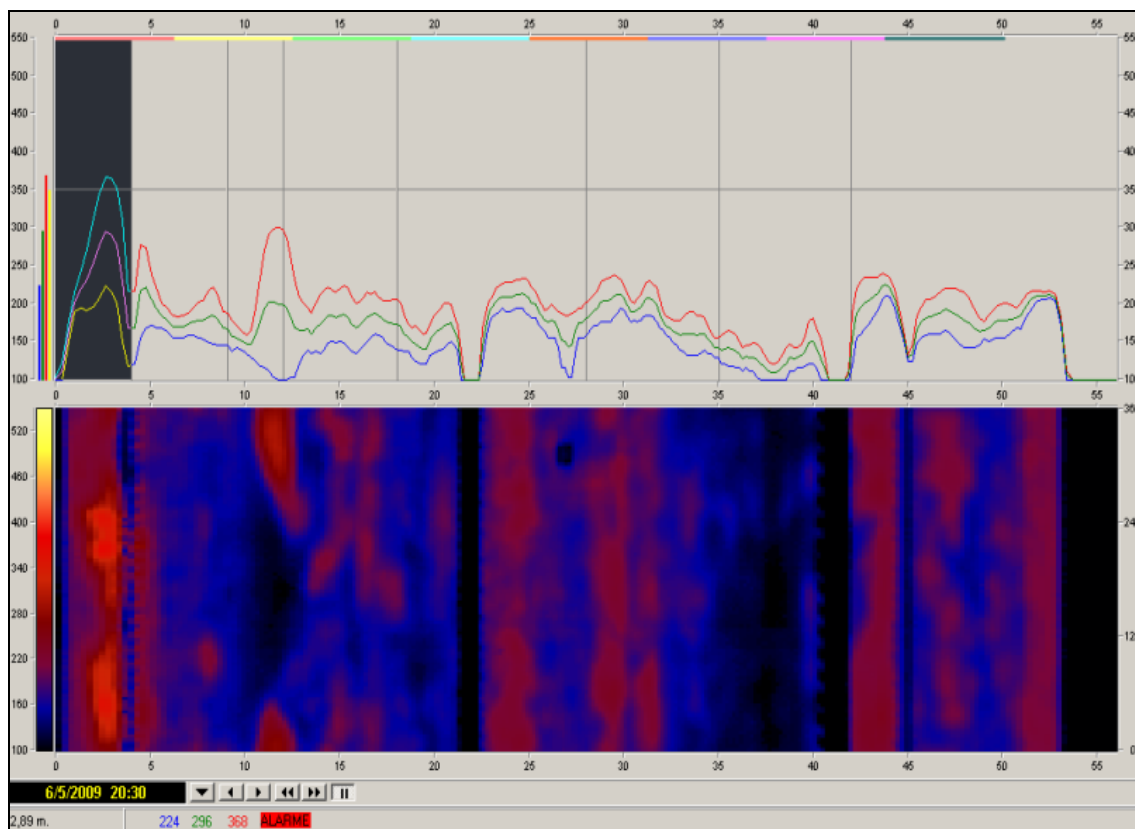


FIGURA 35 - Representação gráfica da temperatura da carcaça do forno registrada pelo monitoramento do Scanner dia 06/05/2009 às 20h30min.

FONTE: Lafarge Brasil (2009).

O perfil da temperatura da carcaça do forno às 10h30min do mesmo dia apresentava valores que caracterizavam uma boa formação de colagem ao longo do forno rotativo e demonstravam que o processo estava estável e com variáveis de processo dentro dos parâmetros de controle. A (FIG. 36) mostra a representação gráfica do monitoramento do scanner às 10h30min, ou seja, dez horas antes do superaquecimento localizado.

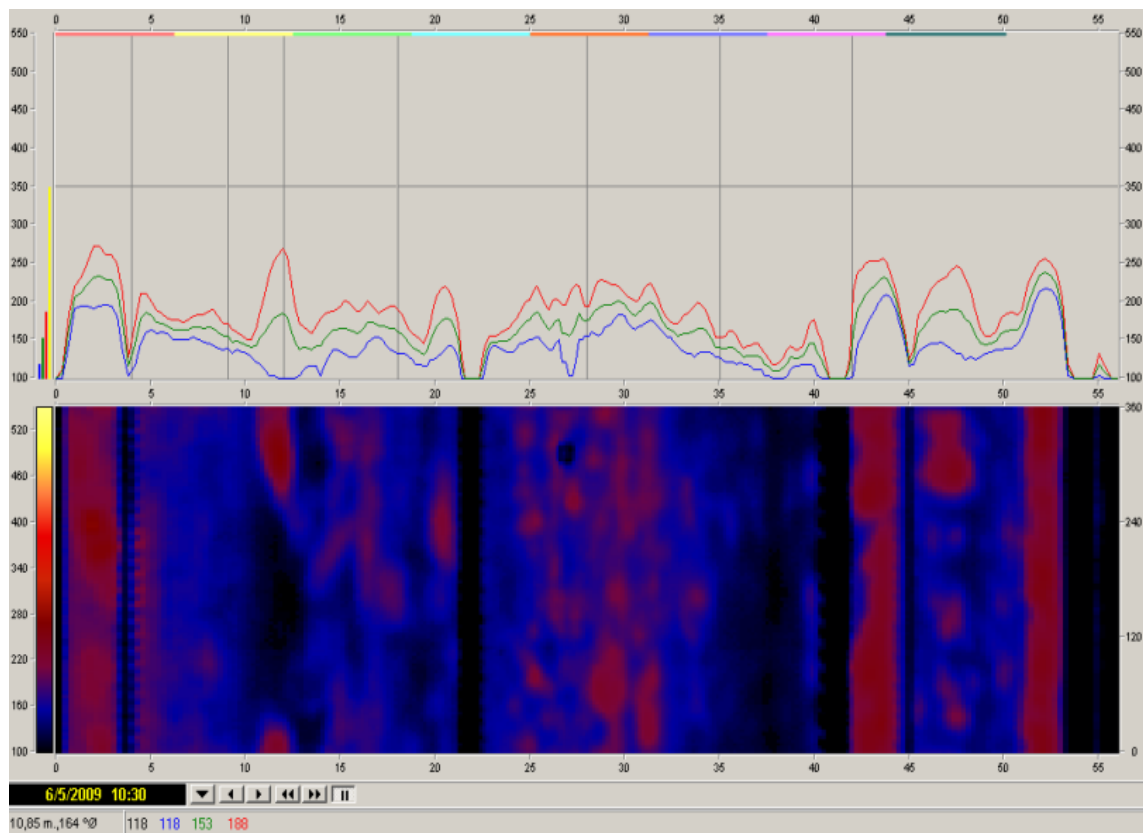


FIGURA 36 - Representação gráfica da temperatura da carcaça do forno registrada pelo monitoramento do scanner às 10h30min do dia 06/05/2009.

FONTE: Lafarge Brasil (2009).

A causa principal dos distúrbios do processo foi em função da parada no moinho de cru que ocorreu de 14h30min às 17h25min.

Durante o período da parada, é gerado pelo processo o pó de arraste também denominado (pó de retorno). De acordo com dados do fabricante (Polysius), a quantidade deste pó de retorno é da ordem de $50\text{g}/\text{Nm}^3$ ou aproximadamente 5% do total alimentado. Este material é composto em sua maioria, de componentes silicosos que por serem mais leves são facilmente arrastados juntamente com os gases. Como o processo é composto de um circuito fechado, este pó retorna para o silo de homo para ser reprocessado e em consequência à parada do moinho de cru não se tem uma alimentação fresca para diluir esta quantidade de pó de retorno. Assim sendo ocorre uma concentração maior de componentes silicosos causando flutuações na qualidade dos módulos de controle, caracterizando uma farinha com baixo FSC.

Como se pode observar na (FIG. 37) que representa graficamente as variáveis de processo, pouco tempo após ocorrer a parada no moinho de cru (linha azul - 211066RF), tem-se uma redução da produção (reduz a alimentação de farinha - linha laranja - 311010FE), para controle de estoque e outros. A partir daí é caracterizado o superaquecimento no forno. A variável Análise NOx (linha rosa – 341001AE3CALC) indica atmosfera oxidante e aquecida saindo de 860 ppm e atingindo 2146 ppm. Nota-se que as características de superaquecimento ocorrem cerca de 3 horas após a parada do moinho, tempo necessário para que a farinha com maior concentração de pó de retorno seja inserida no forno. É importante salientar que por conter componentes silicosos, esta farinha apresenta características de excesso de fase líquida e facilidade de queima, e ocasionar uma “lavagem da colagem”, ou seja, a dissolução da colagem na região mais quente do forno.

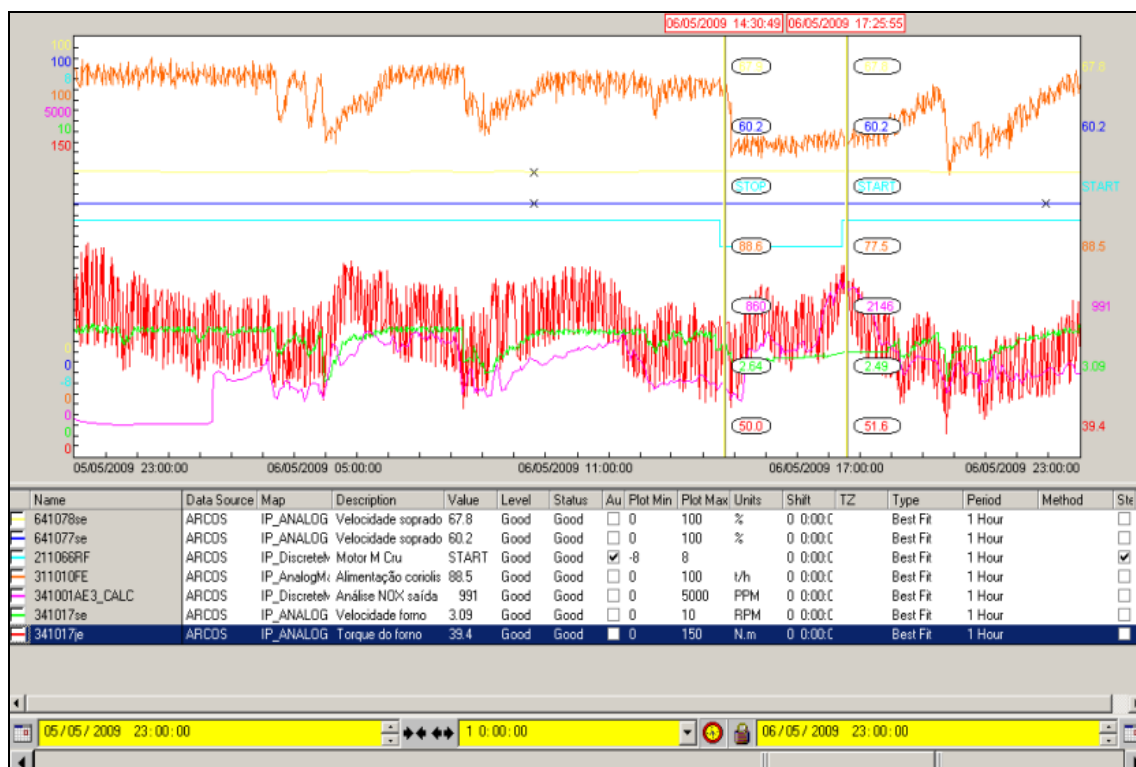


FIGURA 37 – Representação gráfica das variáveis de processo.

FONTE: Lafarge Brasil (2009).

Com base nas informações nota-se que as intempéries podem gerar distúrbios inconvenientes ao processo produtivo a qualquer momento. Por se tratar

de um distúrbio semelhante a outros ocorridos no passado, isto faz com que os conhecimentos adquiridos e a experiência profissional sejam fatores preponderantes no momento da tomada de decisões.

Para solucionar o problema do superaquecimento da carcaça, foi colocado ventiladores para resfriar a região e facilitar a formação da colagem, também com intuito de proteger o revestimento em relação à chama, foi feito ajustes nos sopradores, passando a rotação do soprador radial (rotacional) de 62,5% para 60% e alterando a rotação do soprador axial de 65% para 67% com objetivo de obter uma chama com menor diâmetro e centrada. Depois da parada no moinho de cru, restabeleceu a estabilidade da moagem, eliminou o problema de flutuações na qualidade do cru, com isso o processo entrou em regime de estabilidade. A (FIG. 38) apresenta o monitoramento do Scanner 12 horas após o superaquecimento mencionado. Nota-se que a temperatura apresentada no metro 2,89 não ultrapassa os 300°C e evidencia o acúmulo de colagem na região.

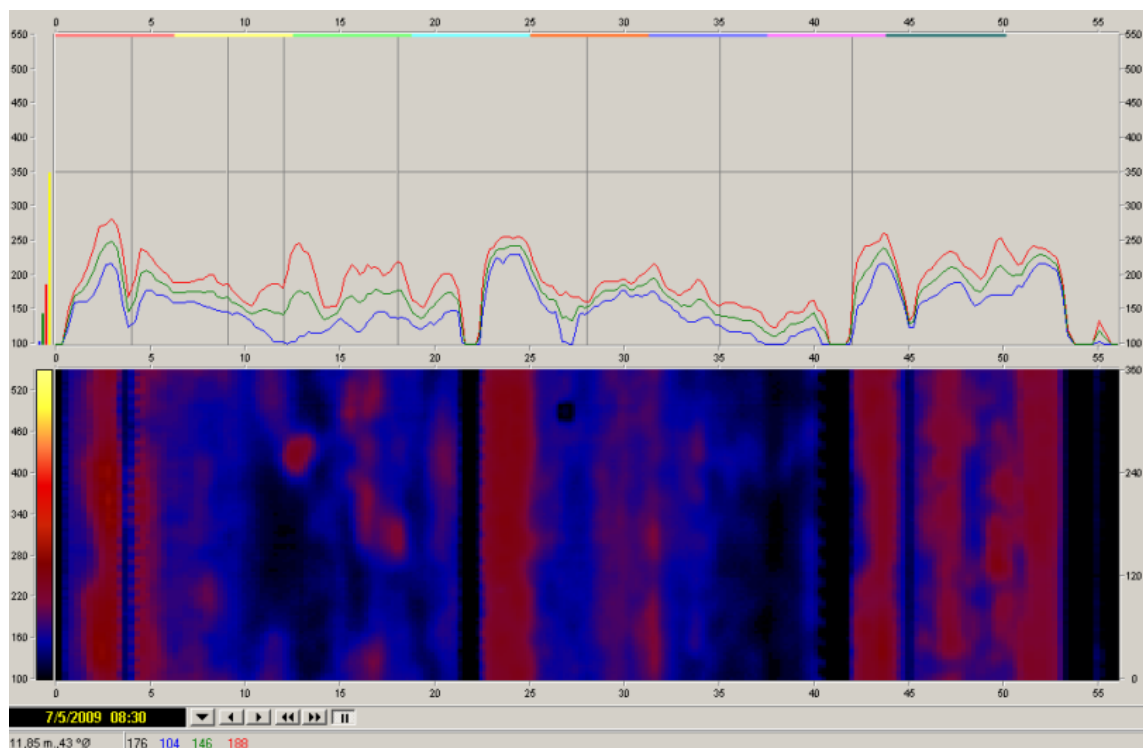


FIGURA 38 – Representação gráfica da temperatura da carcaça do forno registrada pelo monitoramento do Scanner 12 horas após o superaquecimento.

FONTE: Lafarge Brasil (2009).

5.4 Tratamento da formação de colagem na Caixa de Fumaça.

Os compostos gerados pelas reações que acontecem no ciclo dos voláteis são os minerais presentes nas incrustações ou colagens encontrados na caixa de fumaça que possuem via de regra alta capacidade aglutinante, facilitando a aderência, que podem causar obstruções. Para evitar paradas por obstruções, é necessária a intervenção no equipamento mesmo estando ele em operação, com o objetivo de remover o acúmulo de colagem. Esta remoção é feita com ferramentas manuais e bombas hidráulicas de alta pressão.

Este tipo de intervenção é muito prejudicial ao processo, pois ao abrir as portas de inspeção e injetar água no sistema para remoção das colagens, ocorre um resfriamento em todo o processo produtivo e consequentemente reduz a produtividade, aumenta o consumo de combustível e prejudica a qualidade do clínquer como mostra a (FIG. 39) que representa graficamente variáveis de processo, em destaque a densidade do clínquer (linha laranja - 351025xe), que de um valor de 1425 g/l diminuiu para 908 g/l.

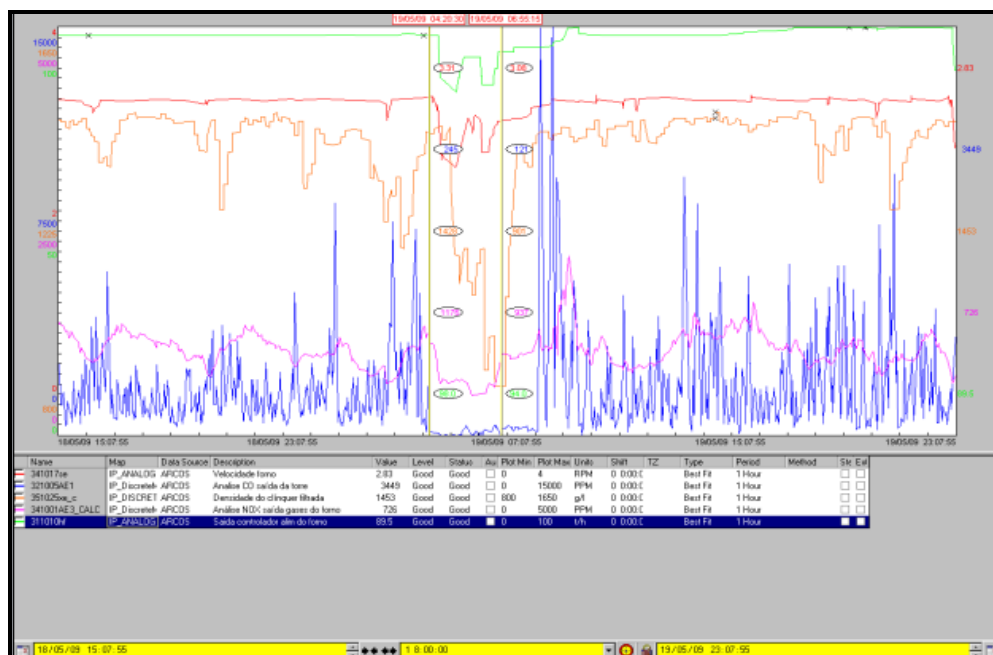


FIGURA 39 – Representação gráfica das variáveis de processo mostrando a instabilidade do forno no momento da intervenção para limpeza da caixa de fumaça.

FONTE: Lafarge Brasil (2009)

A intervenção no equipamento para remoção de colagens expõe os colaboradores a riscos de acidente com material incandescente. A (FIG. 40) ilustra esta atividade dos colaboradores que equipados com EPIs (roupa aluminizada resistente a alta temperatura) executam a limpeza da caixa de fumaça.



FIGURA 40 – Colaborador executando limpeza na caixa de fumaça com bomba hidráulica de alta pressão.

FONTE: Lafarge Brasil (2009).

Outra ação de caráter corretivo é a instalação de canhões de ar comprimido com o bico internamente direcionado para as paredes da caixa de fumaça, que temporariamente dão “tiros de ar comprimido” a alta pressão contra a colagem evitando o acúmulo das mesmas, a (FIG. 41) ilustra este equipamento.



FIGURA 41 – Canhão de ar comprimido.

FONTE: Lafarge Brasil (2009).

A otimização do processo buscando preventivamente a diminuição do acúmulo de colagens na caixa de fumaça começa a partir do consumo responsável de combustível com teor ótimo de enxofre e na seleção adequada de matéria-prima de forma que o valor da relação Enxofre/álcalis não ultrapasse o valor de 1,2% e os elementos que contenham cloro também sejam sistematicamente monitorados, a fim de evitar que sejam consumidos em excesso no processo.

Um controle preventivo para impedir o acúmulo de colagem na caixa de fumaça, é o acompanhamento do produto em processo em que são feitas análises quantitativas com valores em percentual de SO_3 e Cl da farinha, sendo esta amostra coletada na região de calcinação. A (FIG. 42) representa na forma gráfica resultados analíticos do mês de maio e delimita valores para quando não se tem problema com incrustação, quando inicia problema com incrustação e quando se tem acúmulo excessivo e possíveis entupimentos. Através deste acompanhamento é possível tomar algumas ações de forma a minimizar a intensidade de formação de colagem na caixa de fumaça.

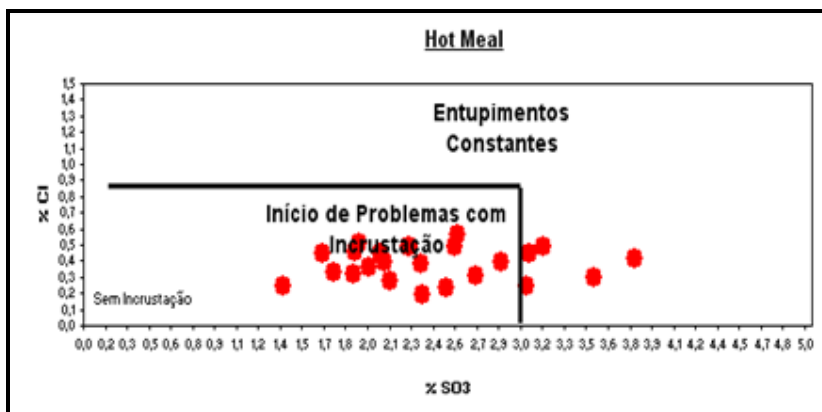


FIGURA 42 – Representação gráfica de resultados analíticos (% de SO_3 e Cl) do produto em processo.

FONTE: Lafarge Brasil (2009).

5.5 Confiabilidade nas análises químicas e físicas

A matéria-prima que é extraída de jazida própria passa por um monitoramento antes que seja feito o desmonte. Nesta etapa é feito um mapeamento das jazidas de acordo com características apresentadas pela matéria-prima, caracterizando um plano de lavra. As matérias-primas e combustíveis tanto convencionais como alternativos adquiridos somente são descarregados na fábrica, após realização da amostragem e efetuada a análise rápida das características físicas e químicas de ambos, (em especial nos combustíveis, principalmente alternativos, é determinado o teor de cloro e flúor), no caso de combustíveis a determinação do poder calorífico é preponderante, pois está diretamente relacionada a custos e estabilidade do processo.

As análises de poder calorífico dos combustíveis são realizadas pela bomba calorimétrica da marca LECO, modelo AC 350, em que a amostra é acondicionada em uma cápsula contendo o gás oxigênio pressurizada a uma pressão 450 PSI. Recebida indução elétrica, efetua-se a combustão da amostra em análise que, quando carbonizada, emite calor e o equipamento o capta, informando o resultado para o operador, já na unidade de medida kcal/kg, que é o resultado PCI.

Já as análises químicas são realizadas pelo sistema de análises semi-quantitativos, via instrumental pelo sistema de difração de raio-x. O raio-x utilizado é o da marca Applied Research Laboratories (ARL), modelo 9800. Quanto ao *software* de aplicação, este é denominado Quantas, de propriedade da ARL, para as análises semi-quantitativas.

A vigilância constante da qualidade dos insumos é de suma importância, isto é devido à estequiometria que deve ser correta para que ocorra a combinação dos elementos durante a clinquerização e à emissão dos gases.

5.6 Monitoramento de atmosfera redutora

Uma atmosfera redutora é extremamente prejudicial ao processo, pois além de envolver custos operacionais, ela contribui também com o processo de formação indesejável de colagens nas zonas frias formando os anéis e na caixa de fumaça. Também está relacionada a riscos de explosões em filtros, dutos, etc, além da questão legal que aborda o contexto emissão de gases poluentes no meio ambiente.

Por estar relacionado aos fatores citados e à estabilidade do processo, o monitoramento da emissão de monóxido de carbono (CO) é contínuo e automatizado, com valores parametrizados na lógica de controle de automação da fábrica. A (FIG. 43) ilustra a tela do *status* da injeção de resíduos (resíduo combustível – pneu). Esta parametrização controla a injeção de resíduos combustíveis alternativos e combustível convencional na torre de pré-aquecimento. Quando a emissão de monóxido de carbono tem seus limites extrapolados por um período de tempo maior ou igual a 3 minutos, automaticamente acontece a parada no sistema de injeção do resíduo combustível e posteriormente persistindo a emissão, o sistema corta também a injeção de combustível convencional. Para exemplificar, de acordo com a parametrização do *status*, quando o CO TORRE > 4000 ppm ou O₂ TORRE < 1,5% e permanece neste intervalo por no mínimo 3 minutos, neste caso ocorre a interrupção da injeção de resíduo até que a emissão de CO normalize.

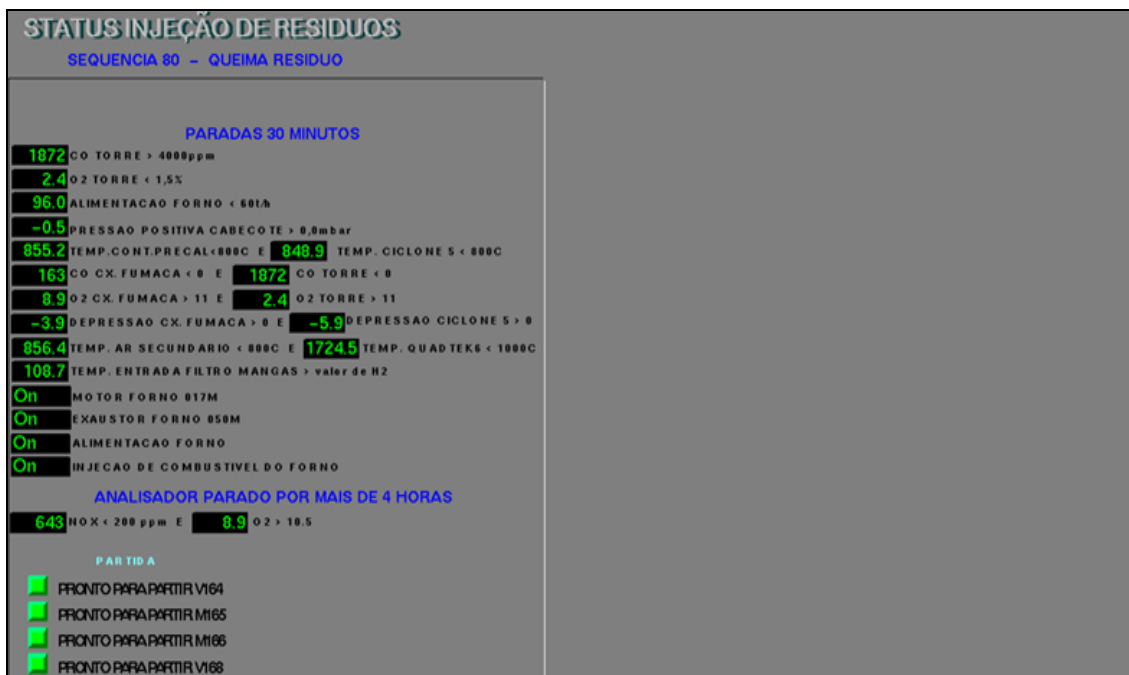


FIGURA 43 - Tela do *status* da injeção de resíduos

FONTE: Lafarge Brasil 2009.

A (FIG. 44) que representa graficamente as variáveis de processo, demonstra um acontecimento de atmosfera redutora (emissão de CO) por um determinado período de tempo (linha verde – 321005AE1). Quando houve o

aumento na emissão chegando a estar acima do valor parametrizado, houve o desligamento da balança dosadora que injeta o resíduo combustível na torre (linha vermelha – 651165RF), este fato foi registrado por quatro vezes na representação gráfica.

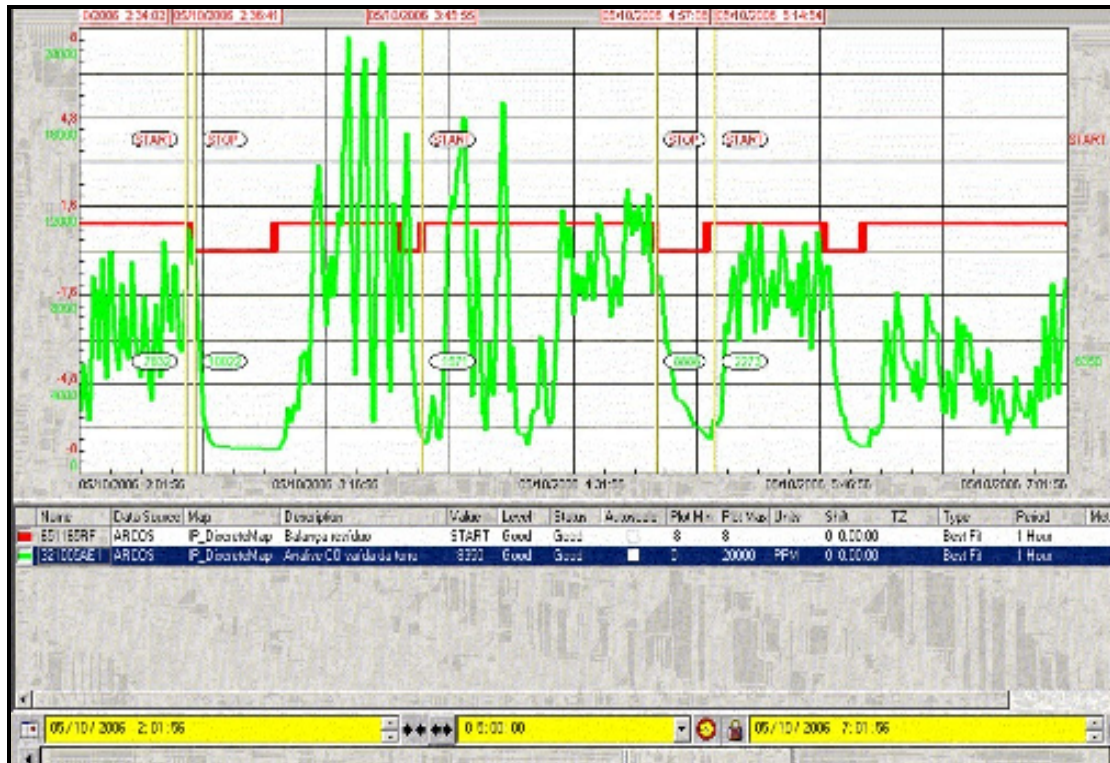


FIGURA 44 - Representação gráfica das variáveis de processo.

FONTE: Lafarge Brasil (2006)

6 SUGESTÕES E MELHORIAS

O objetivo destas sugestões é propor melhorias para o sistema produtivo da empresa Lafarge como um todo, tendo como foco a preservação da vida útil dos equipamentos, a qualidade e custo do produto e a segurança dos colaboradores.

Como base conceitual utilizou-se o referencial teórico desenvolvido no trabalho, para identificar os pontos fracos encontrados no sistema produtivo de clínquer e assegurar que os pontos fortes também identificados sejam aprimorados e disseminados operacionalmente.

Baseado em dados da pesquisa notou-se que uma parada no moinho de cru ocasionou fatores que levaram a um superaquecimento no forno rotativo e uma conseguinte dissolução da colagem na zona de clínquerização.

No momento da parada deste equipamento houve uma maior concentração de pó de retorno com baixo fator de saturação de cal inserido no processo, o que é extremamente favorável ao superaquecimento do forno e que conseqüentemente causou o aquecimento da carcaça, a deterioração do revestimento refratário, flutuações na qualidade do clínquer e em geral, grandes instabilidades ao processo produtivo.

Mediante a esta situação como oportunidade de melhoria sugere-se que seja elaborado um estudo embasado em dados detalhados de quantidade e qualidade deste pó de retorno, bem como a velocidade que este produto chega à zona de clínquerização (região mais quente do forno), afim de que sejam criados padrões operacionais acompanhado de um planejamento para comportamento em situações adversas, possibilitando um ajuste necessário do perfil térmico do forno rotativo, prontificando-o para receber este material de fácil reação.

Outra sugestão seria a implementação de um silo “by pass” para armazenagem do pó de retorno gerado durante todo ou parte do período em que o moinho de cru se mantiver parado. Sendo que posteriormente, após a estabilização do processo de moagem do cru e baseado numa lógica de dosagem, este pó seria reprocessado juntamente com a alimentação fresca.

Quanto à formação de colagem na torre de ciclones, sugiro que seja implantado uma lógica de controle, ou seja, procedimentos operacionais para o monitoramento preventivo rigoroso dos combustíveis e da matéria-prima, com o intuito de manter qualidade da farinha, a relação Enxofre/álcalis e o cloro dentro dos

parâmetros aceitáveis, pois a formação de colagem está diretamente ligada a um, ou/e da combinação destes fatores.

Atualmente percebe-se que ainda não existe o domínio preventivo sobre o problema, embora tenha ações pontuais como canhões de ar na região da caixa de fumaça e acompanhamento de SO_3 e Cl do produto em processo. No entanto nota-se que tais ações são de caráter corretivo e não de preventivo, visando a solução do problema.

Para exemplificar, quando o SO_3 e/ou Cl é detectado no produto em processo, muitas das vezes a caixa de fumaça já está com muita incidência de colagem indesejável. Conseqüentemente, limpezas manuais são necessárias, causando distúrbios ao processo e expondo colaboradores a riscos durante a execução da atividade. Outra ação que geralmente é executada é a redução da injeção de resíduo combustível e matéria-prima alternativa no processo, sem saber se realmente esta é a causa principal do distúrbio, fato é que tal ação pode ser em vão, devido não se ter dados que tornem a ação fundamentada.

7 CONCLUSÃO

Mediante ao estudo realizado é possível concluir que o processo produtivo de cimento é composto de variáveis que nem sempre estão sobre total controle. Como exemplo é possível citar o caso relatado no resultado de pesquisa, onde uma parada imprevista de um equipamento importante da cadeia produtiva, sérios problemas foram causados nas etapas subseqüentes, gerando custos adicionais e relevantes ao processo.

Analisando os dados da pesquisa, nota-se que a empresa possui certo domínio no contexto do mecanismo da formação e dissolução da colagem no processo de fabricação de clínquer, pois é possível observar que as etapas do processo no geral têm seus conceitos embasados em teorias alinhadas ao referencial teórico, porém em situações de caráter imprevisíveis, torna-se um desafio elaborar estratégias e planos que propiciem melhor controle do processo.

Observando o processo de uma forma geral e comparando com o estudo bibliográfico realizado, constatou-se que a empresa possui em algumas de suas atividades fundamentações direcionadas para a correção e pouco direcionadas a prevenção, mesmo dispondo de recursos para atuar de forma como os autores sugerem. Faz-se necessário que a empresa avalie a questão das sugestões propostas no trabalho, pois se entendeu que todos os problemas verificados e melhorias propostas são passíveis de implementação. Podendo minimizar custos de produção através da otimização do sistema produtivo e contribuir para uma maior utilização responsável de combustíveis e matérias-primas alternativas gerando divisas para a empresa.

Os objetivos propostos foram em grande parte alcançados durante a realização deste trabalho e as ferramentas, métodos e procedimentos estudados possibilitaram conseguir identificar os pontos problemáticos, as eventuais falhas, os pontos estratégicos a serem trabalhados no processo produtivo como um todo, para assim ao final da pesquisa propor melhorias e sugestões voltadas principalmente para obtenção de um processo produtivo estável.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HIDRICOS. Disponível em www.cprh.pe.gov.br/downloads/norma-CPRH-N-1-007.pdf. Acesso em 20 de abril de 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: [www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao\(2\).Pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao(2).Pdf). Acesso, 13 de abril, 2009.

ARCELORMITTAL TUBARÃO. **Aços planos**. Disponível em: www.cst.com.br/produtos/co_produtos/catalogo_produtos/escoria_forno/index.asp acesso em 14 de abril de 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Curso de Microscopia de Clínquer de Cimento Portland**. Departamento de Físico – Química da ABCP, São Paulo. Junho de 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de utilização do cimento Portland**. 5. ed. São Paulo, 1999. 28p. (BT-106).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Normas NBR NM 76 – Determinação da finura pelo Método de Permeabilidade ao Ar (Método Blaine) – Jan. 1998.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos Sólidos – Classificação** - Normas NBR série 10004/2004. 20004

ALSOP, Philip A - PhD. **Cement Plant Operations Handbook – For Dry Process Plants**. Fourth edition. January 2005. Trade ship Publications Ltd.

BATTAGIN, Arnaldo Forti (2006). **Uma breve história do cimento** Portland. Disponível em: www.cimento.org.br acesso 05 de março de 2009.

BRASIL. Resolução Conama 264 (1999) **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Diário Oficial da União, 2000.

CÁRPIO, Ricardo Carrasco. **Otimização no uso de co-processamento de resíduo na indústria do cimento, envolvendo custo, qualidade e impacto ambiental**. 194 p. Tese de doutorado, UNIFEI, Itajubá – MG, 2005.

CEMBUREAU, “**Best Available Techniques**” For the cement industry. December 1999.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. 1910 – 1989. **Mini-Aurélio Séc. XXI Escolar: O Minidicionário da Língua Portuguesa / Aurélio B. H. F.** [et al.]. 4 ed. Rev. Ampliada – Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2000.

FUSARO, José Luís. **Desenvolvimento da tecnologia para transformação de fornos de produção de via úmida para via seca, com a utilização de torres de ciclones no processo de precalcinação**. Itajubá, EFEI. Relatório de pesquisa CNPq/EFEI.1990.

GIL, Antonio Carlos. **Tipos de Pesquisa**: Como elaborar um projeto de pesquisa. 4 ed. São Paulo: Atlas, p. 17, 59, 87, 2002.

HARADA, Layse. **Treinamento Co-Processamento**. Lafarge Brasil. ARCOS, 2004.

LAFARGE BRASIL, **CECIL. Curso Para o Ensino de Condução Informatizada Lafarge auto Treinamento e Consulta eletrônico**. ARCOS, versão 2003.

LAFARGE BRASIL, **Curso de formação conceitual de co-processamento**. ARCOS, 2003.

LAFARGE BRASIL, **Dados da empresa Lafarge Brasil**. disponível em: www.lafarge.com.br, acesso em 15 de maio 2009.

LAFARGE BRASIL, **Manual da Combustão Post Sevilla**. Setembro 1997.

LAFARGE BRASIL, **Operações de Fornos Segundo Regras de Padronização Lucie**. Projeto transferência de know-how. Lafarge Arcos. Dezembro de 2005.

LAFARGE BRASIL, **Química do Cimento**. Lafarge Cimento – Projeto Arcos WSO, 1998.

LAFARGE BRASIL, **II Seminário de Processo – Combustão & Refratários**. Setembro 2001.

LAFARGE BRASIL, **Treinamento para Técnicos Fabricação**. Noções básicas do processo forno e torre de ciclones. ARCOS, 1998.

LAFARGE BRASIL, **Treinamento Técnico de Volatilização**. Agosto de 2002.

MAGNESITA S.A – **Folha de dados técnicos** - F.D.T. 2131- 25/06/98, 7114 – 21/08/98, 2348 – 17/10/98, 1998.

MAGNESITA S.A – **Catálogo de produtos Magkor** – outubro 1996.

MARCIANO, Everaldo Júnior, Associação Brasileira de Cimento Portland. **Considerações sobre Fabricação, Matérias-primas, Parâmetros Químicos e Mineralógicos**. Out. 1991

MARQUES, Antonio. **Treinamento conceitual de Co-Processamento**. Lafarge. ARCOS, 2004. [s.e.].

NIELSEN, Hans Alsted. **Evolução e características dos fornos de cimento**. F.L. Smidth – Fuller – Out. 1991

O mundo do cimento em um só lugar. Disponível em: www.cimento.org. Acesso em: 22 de novembro de 2008

OTTOBONI, A. PAULA. **Eficiência de destruição de resíduos utilizados no co-processamento em fornos de cimento rotativos**. In 4º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO. Vol. 2. São Paulo. ANAIS CBC. SÃO PAULO ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. p. 447 a 466,1996.

PINHEIRO, Paulo César da Costa e VALLE, Ramon Molina. **Controle de Combustão: Otimização do excesso de ar**. In. II Congresso de Equipamentos e automação da indústria química e Petroquímica, 09-11 de agosto, 1995, Rio de Janeiro, RJ.

PERAY, Kurt E. **The Rotary Cement Kiln**, 2º ed. Chemical Publishing CO. Inc. New York, N.Y. USA, 1986.

RENÓ, Maria Luiza Grillo. **Uso de Técnicas de Otimização Robusta Multi-Objetivos na Produção de Cimento, Itajubá, 123p**. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2007.

SALOMON, Virgínia Gouveia. **Avaliação dos efeitos da presença de metais pesados nos resíduos co-processados quando utilizados como combustível alternativos e matéria-prima na indústria cimenteira**. Tese mestrado Unifei, 2002.

SANTOS, Aldo Ramos. **A Geração de Coque de Petróleo Devido ao Refino de Petróleos Pesados e o seu Uso Na Produção de Clínquer de Cimento Portland**. Tese de doutorado, UNIFEI, Itajubá – MG, 2005.

SIGNORETTI, Valdir Tesche. **Controle das Emissões de Nox, Sox e Metais Pesados Quando se Utilizam Combustíveis Alternativos e de Alto Teor de Enxofre na Indústria de Cimento.** Itajubá, 272 p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Instituto de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Itajubá – MG, 2008.

SINDICATO NACIONAL DAS INDUSTRIAS DE CIMENTO. **Relatório anual de 2007.** Disponível em www.snic.org.br, acesso em 05 de abril de 2009.

VERGARA, Sylvia Constante. **Pesquisa Participante. Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração,** 4ª ed. São Paulo, p.49, 2003.

GONTIJO, Lourenço Machado e OLIVEIRA, Wedson Souza. **Magnesita S.A. Critérios para Especificação de Materiais Refratários nos Fornos de Cimento – Seminário para Indústria de Cimento.** São Paulo 2001.

ANEXO A - DEFINIÇÕES

By pass: Circuito secundário por onde passa a farinha em caso de problema no circuito principal.

Clínquer: Componente básico do cimento, constituído principalmente de silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico.

Combustível primário: Combustível alimentado pelo maçarico/queimador principal do forno na zona de combustão primária, sendo comumente utilizado carvão, óleo ou gás.

Combustível secundário: Combustível alimentado na zona de combustão secundária, podendo ser utilizado, além dos combustíveis primários, outros alternativos, como: casca de arroz e serragem, entre outros.

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

Farinha ou cru: Produto intermediário para a produção de clínquer, composto basicamente de carbonato de cálcio, sílica, alumina e óxido de ferro, obtidos a partir de matérias primas tais como, calcário, argila e outras.

Forno rotativo de produção de clínquer: Cilindro rotativo, inclinado e revestido internamente de material refratário, com chama interna, utilizado para converter basicamente compostos de cálcio, sílica, alumínio e ferro, proporcionalmente misturados, num produto final denominado clínquer.

Maçarico: Equipamento acoplado ao forno rotativo que produz a chama (combustão).

Pré-aquecedor: Região do sistema forno constituída por um conjunto de ciclones, onde a farinha é alimentada, sendo pré-aquecida e parcialmente calcinada pelo fluxo de gases quentes provenientes do forno rotativo, em contra corrente.

Pré-calcinador: Dispositivo secundário de queima onde ocorre uma pré-calcinação da matéria-prima.

Resíduos: Aqueles que se apresentem nos estados sólido, semi-sólido e os líquidos não passíveis de tratamento convencional, resultantes de atividades humanas. Fica também estabelecido que o termo resíduo compreende um único tipo de resíduo ou mistura de vários, para fins de co-processamento.

Sistema forno: Sistema composto por um conjunto de equipamentos envolvendo as etapas de aquecimento, calcinação e produção final de clínquer, constituído basicamente de forno rotativo, pré-aquecedor, pré-calcinador e resfriador.

Zona de combustão primária: Região do forno rotativo onde ocorre a queima do combustível primário, de forma a proporcionar a temperatura do material em clinquerização, na ordem de 1400°C-1500°C.

Zona de combustão secundária: Região do sistema forno onde ocorre a queima do combustível secundário, na faixa de temperatura da ordem de 850°C a 1200°C, objetivando a pré-calcinação.

Zona de Queima: Local do forno onde ocorrem as reações de clinquerização.