

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
CENTRO TECNOLÓGICO
MESTRADO PROFISSIONAL EM SISTEMAS DE GESTÃO

BENEDITO DA COSTA SANTOS NETO

**PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE GESTÃO NA ATIVIDADE DE
CO-PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS EM FORNOS DE CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Gestão da Universidade Federal Fluminense com requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas de Gestão. Área de concentração: Sistema de Gestão do Meio Ambiente

Orientadora

Prof. ANGELA MARIA ABREU DE BARROS D.Sc

BENEDITO DA COSTA SANTOS NETO

**PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE GESTÃO NA ATIVIDADE DE
CO-PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS EM FORNOS DE CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Gestão da Universidade Federal Fluminense com requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas de Gestão. Área de concentração: Sistema de Gestão do Meio Ambiente.

Aprovado em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA:

Prof.

Prof.

Prof.

Dedico este trabalho

Às nossas famílias, cujo apoio e compreensão, principalmente nas horas em que estivemos mais ausentes, permitiram a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Prof.^a Angela Maria Abreu de Barros pela orientação, apoio, incentivo, amizade e confiança durante a realização do trabalho.

Aos colegas de trabalho pelo enorme apoio na parte experimental.

À minha esposa e filho pelo amor, incentivo, apoio e ajuda. Além disso, a compreensão pelos inúmeros finais de semana sem o lazer em decorrência desse trabalho.

Agradecemos a toda equipe de professores do curso de mestrado profissional em sistema de gestão, UFF – Latec, cuja experiência profissional, dedicação e acessibilidade, sempre em prontidão para auxiliar-nos em quaisquer assuntos, permitiu-nos evoluir em conhecimento e realizar este trabalho.

À todos aqueles que, de alguma forma, prestaram sua contribuição a este trabalho.

“Se não sabe para onde quer ir então
pouco importa o caminho que irá tomar.”

Lewis Carroll

RESUMO

O presente trabalho surge da crescente preocupação a respeito das práticas de disposição de resíduos industriais, de forma a propiciar um desenvolvimento sustentável. A impossibilidade ou falta de opção de tratamento de um determinado resíduo e o desejo de eliminação de um passivo ambiental conduz à escolha de diversas técnicas. Entre elas, o co-processamento em fornos de cimento se destaca como um importante recurso a ser utilizado pelas empresas geradoras de resíduos. Para demonstrar que a atividade de co-processamento de resíduo industriais em fornos de cimento poderá não influenciar em emissões atmosféricas acrescida dos poluentes NO_x , SO_2 , CO, THC e MP, foi proposto um Sistema de Gestão de Resíduo para essa atividade, desde o aceite do resíduo no gerador, recebimento na fábrica, passando pelas etapas de injeção no forno, monitoramento e a avaliação do resultados das emissões atmosféricas. Também foram realizados testes com injeção de resíduos no sistema forno das fábricas de cimento em estudo com objetivo de observar o comportamento nas emissões dos poluentes citados. Os resultados levaram, em linhas gerais, as seguintes considerações: A implementação ou o desenvolvimento de um Sistema de Gestão de Resíduo na atividade de co-processamento em forno de clínquer, poderá se constituir em uma importante ferramenta de gerenciamento para as indústrias de cimento que co-processam resíduo reduzindo e/ou eliminando as emissões acrescidas em decorrência dessa atividade. A análise dos resultados obtidos nos cinco testes realizados associada às demais informações disponíveis, não evidenciou alterações significativas nos níveis de emissões atmosféricas para todos os poluentes citados que pudessem ser associadas à utilização dos resíduos. Sendo que para poluente NO_x , o teste demonstrou que houve redução da concentração em decorrência da utilização de resíduo.

Palavras-chave: Resíduos industriais, co-processamento de resíduos, emissões atmosféricas, sistema de gestão.

ABSTRACT

The current project emerges from the increasing concern regarding the practices of disposal of industrial waste in order to provide a sustainable development. The impossibility or lack of options when treating certain residues and the desire to eliminate risky environmental liabilities leads to the selection between diverse techniques. Among them, the co-processing in cement kilns distinguishes itself as an important resource to be utilized by the industries which produce such residues. To demonstrate that the activity of co-processing of industrial waste in cement kilns, may not influence atmospheric emissions of pollutants increased by NO_x, SO₂, CO, THC and MP, it has been proposed a system of waste management for this activity, beginning with the residue acceptance in the generator, reception at the factory, passing through the kiln injection stages, the monitoring and evaluation of the results of atmospheric emissions. Tests with injection of waste in the system of cement factories kiln under study were also made in order to observe the behavior of emissions of pollutants mentioned. The results led to the following considerations: The implementation or development of a Waste Management System in the activity of co-processing in clinker kiln, may constitute an important management tool for cement industries which co-process waste reducing and / or eliminating emissions increased as a result of that activity. The analysis of the results obtained in the five tests made, linked to the other information available, showed no significant changes in levels of atmospheric emissions for all the other pollutants cited that could be associated with the use of waste. As for pollutant NO_x, the test showed that there was a reduction of concentration due to the use of waste.

Keywords: Industrial waste, co-processing of residues, atmospheric emissions, Management system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Evolução da produção de Cimento Portland de 1970 a 2006	40
Figura 02 – Principais produtores de cimento do Brasil e localização das fábricas	42
Figura 03 – Vista parcial da zona de queima primária de um forno de clínquer com resfriador de satélites	45
Figura 04 – Forno rotativo de via seca com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones, com indicação dos fluxos de farinha e gases	51
Figura 05 – Fluxograma simplificado do processo de produção de clínquer e cimento	54
Figura 06 – Fluxos das matérias-primas cruas e dos gases gerados num forno de via seca com pré-aquecedor de ciclones	63
Figura 07 – Fluxos das matérias-primas cruas e dos gases gerados num forno de via seca com pré-aquecedor de ciclones e pré-calcinador	64
Figura 08 – Perfis de temperaturas dos gases e materiais sólidos num sistema-forno equipado com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones, e pré-calcinador	65
Figura 09 – Caracterização das zonas integrantes do processo de produção de clínquer em sistema-forno de via seca com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones	66
Figura 10 – Corte esquemático de um resfriador de clínquer rotativo	72
Figura 11 – Corte esquemático de um resfriador de clínquer de satélites ou planetário	73
Figura 12 – Corte esquemático de um resfriador de clínquer de grelhas móveis	74
Figura 13 – Corte esquemático de um resfriador de clínquer de grelhas (convencional)	74
Figura 14 – Oferta interna de energia (%), no Brasil, no período de 1940 a 2001	78
Figura 15 – Croqui esquemático identificando os ciclos internos e externos de componentes voláteis no sistema-forno com pré-aquecedor – tipo torre de ciclones	85
Figura 16 – Vista interna de um filtro elétrico	90
Figura 17 – Seção do duto do filtro elétrico	91
Figura 18 – Filtro eletrostático completo	92

Figura 19 – Maçarico principal do forno de clínquer	122
Figura 20 – Tela computador do painel central da fábrica de cimento RJ com destaque para filtro elétrico e temperatura entrada do filtro	134
Figura 21 – Gráfico com resultado do teste com MP na Fábrica de Cimento RJ	136
Figura 22 – Variação do MP vs percentual de resíduo na farinha	138
Figura 23 – Variação do THC vs percentual de resíduo na farinha	139
Figura 24 – Gráfico variação da emissão do CO vs teores de carbono na farinha	142
Figura 25 – Concentrações de CO vs temperaturas dos gases	142
Figura 26 – Forno de clínquer com pré-aquecedor, tipo torre de ciclone	144
Figura 27 – Emissão de CO vs teor de C na farinha da fábrica de cimento A	145
Figura 28 – Concentrações teóricas de equilíbrio de óxido nítrico no gás de combustão mantido no ar	147
Figura 29 – Gráfico demonstrando concentrações de NO _x quando co-processando resíduo em 2 t/h e 5 t/h	152
Figura 30 – Gráfico demonstrando concentrações de NO _x quando co-processando resíduo em 2 t/h e 5 ton/h - Indústria de Cimento B.	155
Figura 31 – Ciclo do enxofre num sistema-forno de via seca com pré-aquecedor e pré-calcinador	161
Figura 32 – Fluxograma de aceite/recusa de resíduo 1º critério	163
Figura 33 – Fluxograma de aceitação/ recusa de resíduos, 2º critério	164
Figura 34 – Fluxograma de recebimento de resíduos	166
Figura 35 – Pontos de injeção de resíduo na planta da Fábrica de Cimento RJ	168
Figura 36 – Fluxograma do gerador ao co-processamento	170
Figura 37 – Tela computador do painel central da fabrica de cimento RJ com destaque para filtro elétrico e poluente (MP; THC, CO; SO ₂ ; NO _x)	171
Figura 38 – Gráfico com valores dos poluentes CO; SO ₂ , NO _x , THC e MP no período de 2003 a 2007 da fábrica de cimento RJ	173

LISTA DE TABELAS	24
Tabela 01 – Quantidade de resíduos industriais processada por tecnologia	
Tabela 02 – Limites de emissão atmosférica (LE) para o co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer	34
Tabela 03 – Dados de produção importação, exportação, consumo aparente e preço médio do cimento nos anos de 2001 a 2006 em milhões de ton	43
Tabela 04 – Produção mundial capacidade produtiva de clínquer e cimento em milhões de ton	43
Tabela 05 – Consumo específico médio de calor em processo de clínquer industrial para cimento	52
Tabela 06 – Concentrações (ppm) de metais pesados e halogênios em matérias-primas para clínquer e cimento e na crosta terrestre	56
Tabela 07 – Composição química (% em massa) das principais matérias primas, corretivos e farinha crua utilizados em sistemas fornos para a produção de clínquer para cimento	58
Tabela 08 – Parâmetros técnicos e tecnológicos dos resfriadores de clínquer	72
Tabela 09 – Classificação de metais pesados instituída pelo TA – Luft, segundo o grau de toxicidade	82
Tabela 10 – Classificação de metais pesados, segundo a volatilidade, conforme o autor indicado	83
Tabela 11 – Características de um forno de cimento e comparação com um incinerador típico, na combustão de resíduos	102
Tabela 12 – Teste com concentração de NO _x vs co-processamento de resíduos pneus	151
Tabela 13 – Resumo dos testes para redução de SO ₂ da indústria de cimento B	159
Tabela 14 – Resultados emissões atmosféricas fábrica de Cimento RJ – 2003 a 2007	172
Tabela 15 – Modelo de planilha a ser utilizado para controlar diariamente os resultados das emissões atmosférica dos poluentes: MP, CO, SO _x , NO _x e THC	174

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – American Society of Testing Materials
BIF – Hazardous Waste Burned In Boilers and Industrial Furnaces
CCPA – Canadian Chemical Producer Association
CDR – Certificado de Destruição do Resíduo
CAC – Consumo Aparente de Cimento
CE – Comunidade Européia
CEMBUREAU – The European Cement Association
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CO – Monóxido de Carbono
CKD – Cement Kiln Dust
CKP – Chihichibu-Kawasaki Pegginder
CSS – Combustível Sólido de Substituição
EAR – Estudo de Análise de Risco
E-CFR – Eletronic Code of Federal Regulations
ECP – Equipamento de Controle de Poluição
EDR – Eficiência de Destruição E Remoção
EU – European Union
EVQ – Estudo de Viabilidade de Queima
FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente
FS – Fator de Saturação
ETE – Estação de Tratamento de Efluentes
HPPs – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
THC – Total Hidrocarboneto
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
LI – Licença de Instalação
LO – Licença de Operação
LP – Licença Ambiental Prévia
MP – Material Particulado

NO_x - Óxidos de Nitrogênio

PAP – Poluente Atmosférico Perigoso

PCB's – Bifenilas Policloradas

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

PCI's – Produtos de Combustão Incompleta

PCOP – Principal Composto Orgânico Perigoso

PNMA – Política Nacional do Meio Ambiente

PRONAR – Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar

PROCON-AR – Programa de Controle do Ar

PTB – Plano de Teste em Branco

PTQ – Plano de Teste de Queima

PDCA – Plan do Check E Action

RAP – Relatório Ambiental Preliminar

RCRA – Resource Conservation and Recovery Act

SMA – Secretaria de Estado de Meio Ambiente

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

SISNAMA – Sistema Nacional de Meio Ambiente

SISSMA – Sistema Integrado de Saúde, Segurança e Meio Ambiente

TB – Teste em Branco

TQ – Teste de Queima

TON – tonelada(s)

UCAH – Unidade Central de Armazenamento e Homogeneização

UNEP – United Nations Environment Programme

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency

SSMA – Saúde, Segurança e Meio Ambiente

SGA – Sistema de Gestão Ambiental

SO₂ – Dióxido de Enxofre

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – O PROBLEMA	15
1.1. Contextualização	15
1.2. Situação Problema	20
1.3. Objetivos da Pesquisa	22
1.4. Questões Propostas	22
1.5. Justificativas e Relevância	23
1.6. Delimitação	25
1.7. Estrutura do Trabalho	25
CAPÍTULO II – REVISÃO DA LITERATURA	27
2.1. Resíduos Industriais	27
2.2. Legislação Ambiental Brasileira	28
2.3. Legislação Ambiental Americana	37
2.4. Legislação Ambiental Comunidade Européia	38
2.5. Indústrias Cimenteiras	39
2.6. Sistema de Gestão Ambiental	103
CAPÍTULO III – METODOLOGIA	113
3.1. Métodos e Estratégia Metodológica	113
3.2. Delineamento da Pesquisa	114
3.3. Instrumento de Pesquisa	114
3.4. Desenvolvimento da Metodologia	115
CAPÍTULO IV – ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	117
4.1. Aspectos Gerais sobre as Mudanças Implementadas no Processo	117
4.2. Estudo de Caso	118
4.2.1. A Empresa	118
4.2.2. Emissões Atmosféricas – Teste Com MP	133
4.2.3. Emissões Atmosféricas – Teste com Poluentes THC e MP	137
4.2.4. Emissões Atmosféricas – Teste Com Poluentes CO, NO _x e SO ₂	140
4.2.5. Proposta de um Sistema de Gestão para a atividade de co- processamento de Resíduos Industriais	160
CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS	176
5.1. Conclusões	176
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	178

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	180
ANEXOS	186

CAPÍTULO 1 – O PROBLEMA

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

No período Paleolítico, há cerca de 200.000 anos, o homem ocupava grande parte do Velho Mundo sobrevivendo da caça, numa forma de vida selvagem e utilizando as peles dos animais como vestimentas para proteção contra as intempéries. Em 10.000 a.C. iniciou-se o período Neolítico ou Idade da Pedra Polida que durou até 4.000 a.C., no qual os ancestrais da espécie deram mais um passo em direção à civilização, organizando-se em formas ainda primitivas de vida em sociedade (CERQUEIRA, 2004).

A necessidade do homem em se defender dos perigos inerentes à vida selvagem o levou à formação de grupos sociais mais complexos – as tribos. Como consequência dessa característica comportamental, de viver em agrupamentos, surgiram os povoados, vilas e demais formas de adensamentos populacionais que resultaram nas cidades. Nelas se concentra o desenvolvimento das principais atividades necessárias à sobrevivência da espécie humana, associado a uma diversidade de problemas, destacando-se nestas considerações, os de natureza ambiental.

Observa-se que o homem, ao longo da cadeia evolutiva, desenvolveu o conhecimento e, conseqüentemente, a capacidade intelectual, cultural e tecnológica, propiciando o descobrimento de inúmeras maneiras de interferir nas relações com o ambiente natural para obter maior nível de conforto e comodidade para a sua existência, destacando-se nesse cenário, o papel representado pela atividade industrial.

Segundo Galvêas (2003), a grande revolução industrial começou a acontecer na Inglaterra, aproximadamente, em 1760 no setor têxtil. Foi motivada pelo rápido crescimento da população e pela constante migração do homem do campo para as grandes cidades, criando excedentes de mão de obra, que permitiram a exploração e expansão de negócios pela burguesia emergente. Tais condições, aliadas ao avanço do desenvolvimento científico, principalmente com a invenção da máquina a vapor, por James Watts, e de inúmeras outras inovações tecnológicas, proporcionaram o início do fenômeno da industrialização mundial.

A partir de meados do século XIX o desenvolvimento industrial evoluiu em velocidade extremamente acelerada favorecendo a produção de bens materiais e de consumo que rapidamente eram, e ainda são incorporados à vida cotidiana. Como resultado, foi verificado um considerável aumento da poluição ambiental, provocado pelas atividades produtivas, refletindo nos meios físico (água, ar e solo) e biológico, e traduzindo-se, ao longo do tempo, num potencial crescente e capaz de provocar profundas alterações nas relações do homem com o meio ambiente. (GALVÊAS, 2003)

No contexto nacional, os órgãos ambientais estaduais, conjuntamente com o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais – IBAMA são responsáveis pelo controle, fiscalização, monitoramento e licenciamento de atividades potencialmente poluidoras, com a preocupação fundamental de preservar e recuperar a qualidade das águas, do ar e do solo. Como exemplo, no estado de São Paulo, a partir da análise dos dados de monitoramento ambiental realizado nos vários compartimentos naturais e divulgados pela Agência estadual, desse estado, confirma-se a hipótese de que a aglomeração humana contribui decisivamente para a degradação da qualidade ambiental (CETESB, 2003 e 2004b).

Pode-se verificar que as regiões metropolitanas das grandes cidades brasileiras sofrem todo tipo de problema ambiental, entre os quais está a deterioração da qualidade do ar, devida às emissões atmosféricas remanescentes de cerca de centenas de indústrias de alto potencial poluidor e de uma frota de milhões de veículos automotores.

A aglomeração humana é também responsável pela maior concentração de resíduos, dentre os quais se incluem aqueles de origem doméstica, cujas características quali-quantitativas podem sofrer alterações dependendo das condições socioeconômicas dos geradores, mantendo, no entanto, base essencialmente orgânica.

Diferentemente, os resíduos gerados nos processos industriais podem apresentar características totalmente diversas e complexas dependendo dos tipos e fontes das matérias-primas, processos e operações industriais empregados, reações químicas envolvidas e uma diversidade de variáveis intervenientes. É a partir desses processos que se transformam as matérias-primas, naturais ou sintéticas, para fornecimento dos insumos e produtos necessários para que o homem possa atingir as “melhores condições de vida”, sob a ótica de maior conforto e comodidade.

Relativamente a esses resíduos, conforme dados de inventariado no Estado de São Paulo, efetuado pela CETESB (2004 d), no ano de 1997 foram gerados 512.196 t/ano classificados como perigosos, dos quais 53% recebiam algum tipo de tratamento, 31% foram armazenados e 16% depositados no solo. Foram gerados ainda 19.519.026 t/ano de resíduos não inertes e 1.012.899 t/ano de resíduos inertes, acerca dos quais não foram informados os tipos de destinação.

Os depósitos clandestinos de resíduos químicos perigosos e áreas de disposição inadequadas de materiais poluidores, vinculados aos empreendimentos industriais, foram responsáveis por 202 das 727 áreas contaminadas existentes no Estado de São Paulo até outubro de 2003 (CETESB, 2004).

A United States Environmental Protection Agency (USEPA) fez uma proposta que consistia na formação de uma estrutura hierarquizada de gerenciamento de resíduos baseada primariamente em preocupações ambientais. Contemplava a redução e minimização; separação e concentração; permuta; recuperação material e energética; tratamento/incineração e disposição final segura. Observa-se o desenvolvimento ainda incipiente, nos últimos anos, dessas iniciativas de gestão de resíduos sólidos.

A política adotada pelas principais Agências Ambientais, ao dar transparência aos problemas constatados, associada à maior facilidade de acesso à informação, sobretudo com o advento da rede mundial de computadores, se reflete no gradual aumento do interesse popular e conseqüentemente de maiores pressões e exigências para a gestão racional dos recursos naturais e da preservação do meio ambiente. Como conseqüências crescem, por exemplo, as demandas por formas sanitárias e ambientalmente adequadas para o tratamento e disposição final de resíduos. Nesse contexto insere-se a necessidade de maiores investimentos na investigação das formas de destruição térmica, principalmente quanto aos aspectos associados aos riscos à saúde pública e ao meio ambiente.

Oppelt (1986) já atestava que sistemas de destruição térmica, devidamente projetados, ofereciam a possibilidade de destruição dos componentes orgânicos perigosos de correntes de resíduos, sendo os mesmos reconhecidos, no decorrer da década de 70, como alternativa progressivamente mais desejável que os métodos tradicionais de disposição em aterros, lagoas ou injeção em poços profundos de mineração.

Em conformidade com os aspectos apresentados, a proposta deste trabalho de pesquisa procura enfocar uma tecnologia alternativa de destruição de parte dos resíduos sólidos industriais, concomitante à produção de clínquer para cimento, denominada co-processamento, dando enfoque à avaliação das emissões atmosféricas provenientes dessa prática.

Portanto, o co-processamento é a destruição de resíduos industriais e de passivos ambientais em fornos de cimento.

O conceito fundamenta-se na substituição parcial dos combustíveis fósseis tradicionais por resíduos com significativo potencial energético para aporte ao sistema-forno. Contempla também a possibilidade de substituição de matérias-primas por resíduos que apresentem características qualitativas semelhantes às aquelas normalmente empregadas no processo produtivo.

Kihara (1999) refere que os primeiros experimentos bem sucedidos na área do co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer para cimento foram realizados na década de 70 no Canadá e, posteriormente, na Europa e Estados Unidos. Dados atuais disponíveis na literatura especializada e Internet indicam que quantidades significativas de resíduos industriais têm sido utilizadas em fábricas de cimento do Japão, Estados Unidos e da União Européia, em substituição parcial à energia consumida no sistema-forno, demonstrando a viabilidade operacional e econômica da tecnologia. Resíduos de origem doméstica também são utilizados como combustível complementar em fornos de via úmida na Inglaterra, em substituição de até 30% da quantidade de carvão necessária no processo (MENON et al., 1993).

A USEPA (1994) descreve que as principais emissões atmosféricas geradas no processo de manufatura de clínquer para cimento portland, sem o uso de resíduos, resumem-se aos parâmetros: material particulado (MP), óxidos de nitrogênio (NO_x – expresso em NO_2 , dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos totais (THC) e dióxido de carbono (CO_2). Refere que podem também ser emitidas pequenas quantidades de compostos orgânicos voláteis (COV), amônia (NH_3), cloro (Cl_2) e ácido clorídrico (HCl), assim como materiais residuais dos combustíveis e matérias-primas e, ainda, produtos de combustão incompleta.

As matérias-primas e os combustíveis utilizados também contêm quantidades traço de metais pesados que podem ser emitidas para a atmosfera através dos fluxos gasosos exauridos, via chaminés, do sistema-forno.

A evolução das tendências mundiais, fruto da crescente conscientização do homem para com as questões ambientais globais exige maior racionalidade no uso da energia e dos recursos naturais não renováveis, mas deve também privilegiar a continuidade do desenvolvimento de tecnologias que favoreçam a melhoria constante da qualidade de vida da população.

A aceleração do processo econômico amplia o uso de produtos químicos nas indústrias o que, por conseguinte, proporciona a geração crescente de resíduos industriais, classificados como perigosos pelos impactos que causam à saúde humana e ao meio ambiente.

Frente a esse quadro, as indústrias de cimento têm sido uma das alternativas com significativo potencial para colaborar na minimização de dois relevantes problemas atuais: a destinação inadequada de resíduos e a exaustão de recursos naturais não renováveis.

As altas temperaturas e longos tempos de residência nas zonas de combustão dos fornos que são utilizados para a queima de resíduos industriais, e adaptações tecnológicas nos processos, permitem seu uso como combustíveis alternativo/complementares pela indústria cimenteira, ou seja, uma percentagem de resíduos substitui os combustíveis fósseis. Isto proporciona receitas para as cimenteiras, tanto pela queima, cobrada dos geradores para disposição final, como pela redução do combustível fóssil, além de contribuir na redução de consumo de recursos naturais.

A essa atividade denomina-se co-processamento, pois enquanto os resíduos estão sendo destruídos no interior do forno, está acontecendo a produção do clínquer.

As indústrias de cimento vêm, há anos, buscando a sustentabilidade de seus negócios, através de alterações tecnológicas e melhorias nos seus processos, principalmente na substituição de combustível, onde os resíduos perigosos têm tido papel significativo. No entanto, essa prática tem trazido muitos questionamentos sobre a sustentabilidade ambiental quanto às emissões atmosféricas dos gases que saem pelas chaminés do forno.

Portanto, consideramos oportuno neste cenário, a proposta de se estudar as emissões atmosféricas dos gases que saem pelas chaminés dos fornos de clínquer que co-processam resíduos industriais, sendo essa a proposta de dissertação. O seu objetivo consiste em analisar empresas, de forma que, a partir destas, se possa inferir ou obter conclusões que evidenciem os reais impactos ambientais, em termos de emissões, gerados pela atividade de co-processamento. Esse estudo visa permitir que as empresas vislumbrem oportunidades e desafios e concluam pelo aperfeiçoamento de seus modelos de gerenciamento, tornando-os sintonizados com as modernas tendências de gestão de resíduos.

1.2. A SITUAÇÃO PROBLEMA

A disposição dos resíduos industriais não passíveis de reutilização e reciclagem constitui-se em um problema legal e ambiental, que vem preocupando cada vez mais as empresas geradoras, em função da pressão exercida pela comunidade e pelos órgãos de controle, no sentido de dispor estes resíduos de forma ambientalmente adequada.

As sociedades desenvolvidas precisam da indústria para produzir energia e bens que mantenham seu estilo de vida. As atividades industriais abrangem processamento de alimentos, mineração, produção petroquímica e de plástico, metais e produtos químicos, papel e celulose, e a manufatura de bens de consumo, como a televisão. Por sua vez, a indústria necessita de matéria-prima, como o ferro, a água e a madeira, para a produção desses bens. Esses processos de manufatura produzem lixo, que pode ser inofensivo ou tóxico, e são conhecidos tecnicamente como resíduo.

Segundo Maringolo (2004), a destinação de resíduos industriais classe 1 (conforme a norma ABNT-NBR 10004/2004 para classificação de resíduos perigosos) segue a seguinte distribuição: destino ignorado, 78%, aterro licenciado, 16%, co-processamento em fornos de clínquer, 5% e incineração, 1%.

Na Europa 12,5% dos resíduos industriais são co-processados, enquanto nos EUA, 6,5% têm destinação semelhante (EPA – 2006).

Verifica-se, portanto, que nos países chamados industrializados a técnica de co-processar os resíduos industriais em fornos de clínquer é bastante utilizada.

Nos últimos anos as fábricas de cimento têm sido solicitadas pelas indústrias para dar disposição ambientalmente correta para seus resíduos.

No Brasil, estima-se que as cimenteiras co-processam de 70-80% dos resíduos das empresas denominadas de blendeiras¹. Essas empresas misturam diferentes resíduos industriais de diversas fontes geradoras, formam um novo resíduo, dão a eles um nome e enviam às cimenteiras para serem co-processados nos fornos de clínquer. A outra parcela de 20-30%, as cimenteiras recebem direto dos geradores, e estes, por se tratar de resíduos *in natura*, não são necessários passar pela blendagem (própria do autor).

Os fornos de clínquer (matéria prima do cimento) apresentam características operacionais desejáveis para processamento de resíduos perigosos: altas temperaturas dos gases – 2000 °C, ambiente oxidante, alta turbulência e tempo de residência dos gases: 5-6 segundos acima de 1200 °C.

Na fabricação de clínquer, no interior do forno, geram-se gases, vapores de metais pesados, óxidos metálicos e material particulado. A fração sólida que não retorna ao forno é coletada no equipamento de controle de poluição, normalmente constituído por filtro de mangas ou precipitador eletrostático, antes de sair pelas chaminés e se dispersar para o meio ambiente.

A legislação brasileira, Resolução CONAMA 264/99, estabelece limites máximos de emissões para forno de clínquer que co-processam resíduos industriais.

Sem um adequado sistema de gestão de resíduos, as indústrias de cimento podem gerar emissões acima dos limites estabelecidos pela legislação, que além de poluir o meio ambiente, e conseqüentemente a saúde humana, podem proporcionar passivos ambientais para seu negócio, com possibilidade de multas e ferindo a imagem da empresa diante da comunidade local, empregados, governos e acionistas.

¹ Blendeiras – to blend = misturar, combinar.

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.3.1. Objetivo Geral

Demonstrar que a atividade de co-processamento, em se tratando de emissões de NO_x, SO₂, CO, THC e MP, corresponde a uma alternativa ambientalmente correta na destruição dos resíduos industriais .

1.3.2. Objetivos específicos

- Avaliar as emissões dos parâmetros NO_x, SO₂, CO, THC e MP nas atividades de co-processamento em forno de clínquer para a destruição de resíduos industriais ;
- Propor um sistema de gestão para redução das emissões dos poluentes NO_x, SO₂, CO, THC e MP considerando as melhores práticas disponíveis;
- Demonstrar que há possibilidade de não se ter emissões acrescidas dos poluentes NO_x, SO₂, CO, THC e MP decorrentes da inclusão da atividade de co-processamento de resíduos industriais no processo de fabricação de cimento.

1.4. QUESTÕES PROPOSTAS

Gerar um trabalho que possa responder às questões levantadas nos objetivos, tais como:

1. A atividade de co-processamento, em se tratando de emissões de NO_x, SO₂, CO, THC e MP pode ser considerada uma alternativa ambientalmente correta para destruição de resíduos industriais ?
2. A avaliação das emissões em consonância com o estudo do SGA da(s) empresa(s) oferece subsídios para demonstrar à comunidade que a atividade de co-processamento não gera impactos ambientais aceitáveis ao meio ambiente?

1.5. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A geração de resíduos representa um dos maiores desafios para as sociedades contemporâneas. O crescimento populacional e o constante desenvolvimento das indústrias obrigam a busca de soluções para o manejo adequado dos resíduos.

O cimento Portland sempre esteve ligado ao desenvolvimento da sociedade em todos os aspectos. Afinal, com ele é possível construir desde simples casas até complexos pólos industriais.

Por outro lado, ele é fruto de uma atividade industrial que também gera impactos ambientais e que exige da indústria uma postura pró-ativa, fazendo com que ela atue de modo altamente contributivo para a sustentabilidade do planeta.

A indústria do cimento coloca seus fornos de cimento à disposição de outros para a eliminação de resíduos industriais. Essa alternativa de destruição de resíduos, considerada uma das mais eficientes, é denominada co-processamento.

Além dos benefícios ao meio ambiente, é uma atividade que gera empregos diretos e indiretos e é regulamentada, em nível nacional, pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA).

No Brasil, a partir da década de 90, as indústrias de cimento passaram a utilizar nos seus fornos de clínquer resíduos industriais em substituição parcial aos combustíveis convencionais. No início, apenas 4 fábricas possuíam licenças ambientais para co-processar resíduo. Atualmente são 32 fábricas de cimento em todo o Brasil com licenças ambientais para co-processar resíduos industriais.

Conforme ABETRE – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduo, em 2004 a quantidade de resíduos industriais processada foi de em 2,98 milhões de ton e as indústrias de cimento co-processaram algo em torno de 470 mil ton/ano de resíduos industriais, correspondendo a aproximadamente 16% do total. Em 2005 o volume co-processado foi de 690 mil ton correspondendo aproximadamente 21% desse valor. A expectativa é que esse volume possa chegar a 1,5 milhões de ton (ABCP 2006).

Tabela 1 – quantidade de resíduos co-processados em 2004 e 2005 e outras tecnologias.

QUANTIDADE PROCESSADA POR TECNOLOGIA (TON)	2004		2005	
RESIDUOS INDUSTRIAIS	2.978.331	100%	3.295.189	100%
Aterro Classe II -A	1.723.604	58%	1.600.896	49%
Aterro Classe II -B	443460	15%	490198	15%
Aterro Classe I	119.644	4%	235.466	7%
Co-processamento em fornos de clínquer	470000	16%	690000	21%
Inceneração	48.219	2%	63.630	2%
Outros tratamentos térmicos	53096	2%	78608	2%
Tratamento biológico	5.000	0%	13.557	0%
Reciclagem	115.308	4%	122.834	4%

Fonte: ABETRE 2006

Importante destacar que o levantamento da quantidade de resíduos industriais gerados pelas indústrias tem sido o grande desafio para os organismos federais, associações e etc. Em 2003, a ABETRE contratou uma empresa de consultoria para desenvolver um estudo detalhado do assunto, com o objetivo final de estimar a quantidade de resíduos industriais gerada anualmente no país e conclui que devido à inexistência de informações ou dados sistematizados, não era possível desenvolver, com metodologia tecnicamente validada, modelos ou estimativas de geração de resíduos industriais no Brasil.

O co-processamento proporciona aos geradores uma alternativa para a destinação final e às cimenteiras uma forma de reduzir custos operacionais através da receita adquirida com a queima e a substituição parcial do combustível convencional.

Isto posto, a demanda pela queima de resíduos nas cimenteiras tem crescido de uma forma rápida, fazendo com que haja necessidade de uma reestruturação interna para receber e co-processar resíduos sem gerar impactos ao meio ambiente.

Dessa forma, a proposta de implementar um Sistema de Gestão na atividade de co-processamento de resíduo, desde as blendeiras até a destruição nos fornos de clínquer, poderá servir de referência para as indústrias cimenteiras que procurem demonstrar a importância de se implantar tal Sistema de Gestão

Ambiental, na busca de soluções aos problemas ligados às emissões atmosféricas em atividades de co-processamento de resíduos industriais.

1.6. DELIMITAÇÃO

Este trabalho se propõe a avaliar, através de dados obtidos nas cimenteiras, se há emissões atmosféricas acrescidas nos parâmetros NO_x, SO₂, CO, THC e MP em decorrência da atividade de co-processamento de resíduos industriais perigosos.

Neste aspecto, não serão propostas abordagens para os seguintes assuntos:

- Avaliar se a atividade de co-processamento de resíduos em forno de clínquer pode causar impactos negativos com relação à exposição ocupacional; impactos à saúde de pessoas que não estejam ligadas à atividade, interna e externamente ao site².
- Avaliar se a atividade de co-processamento de resíduos em forno de clínquer pode causar impactos à saúde pública através das emissões para atmosfera e do cimento produzido.
- Avaliar se há emissões acrescidas para os seguintes parâmetros: dioxinas e furanos, HCl, HF, Cl₂, metais, etc.

1.7. ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação obedece basicamente à seguinte estrutura:

Capítulo I – Na contextualização do tema é descrito o aumento da poluição ambiental decorrente do processo acelerado do desenvolvimento industrial com grande geração de resíduos e poluição atmosférica. Cita que a indústria de cimento pode ser uma alternativa ambientalmente correta para gestão de resíduos.

Faz referência à situação problema, aos objetivos, à justificativa e relevância, à delimitação do estudo, às hipóteses a serem desenvolvidas e à organização do trabalho.

² Site – terreno ou área onde está construída a indústria estudada.

Capítulo II – Revisão da literatura onde é feita uma abordagem de caráter não exaustivo sobre as referências técnicas nacionais e internacionais utilizadas e pesquisadas sobre o assunto.

Capítulo III – Apresenta-se a Metodologia de Pesquisa adotada e os passos metodológicos segundo autores citados no trabalho; o planejamento para a obtenção dos objetivos.

Capítulo IV – Estudo de caso e discussão dos resultados onde o tema da dissertação é apresentado de forma detalhada, em sua dimensão conceitual, técnica e metodológica, com definições, explicações, análises e figuras ilustrativas, obtidas na indústria cimenteira pesquisada.

Capítulo V – Apresenta a conclusão e formulam-se propostas para trabalhos futuros que venham a contribuir para Gestão de Resíduos na atividade de co-processamento de resíduos em fornos de clínquer.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

2.1. RESÍDUOS INDUSTRIAIS

2.1.1. Definição

Resíduo industrial é o lixo que resulta dos processos de produção das indústrias.

Segundo a norma ABNT-NBR 10004/2004, “Resíduos sólidos – Classificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)” são classificados em:

Classe I – Resíduos Perigosos

Classe II – Resíduos não Perigosos. Estes são divididos em:

Classe II A – Inerte

Classe II B – Não Inerte.

São considerados resíduos Classe I (perigosos) os resíduos que, em função das suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podem apresentar risco à saúde pública, provocando ou acentuando, de forma significativa, um aumento da mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentam efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada.

Exemplos de resíduos Classe I: Borra de Fundo de Tanque de Petróleo, Tintas usadas, Catalisador Usado, Lodos de Tratamento de Águas Industriais, Lixos Ambulatoriais, Solventes. Estes possuem as seguintes características que lhe conferem periculosidade: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Exemplos de resíduos Classe II: terras contaminadas, carepas, óleos usados, plásticos contaminados, EPI's usados, águas residuais de processos, sucata metálica, que possuem as seguintes características:

Os resíduos Classe II A – Inertes, são aqueles que não se enquadram como Classe I. Como exemplo, pode-se citar rochas, tijolos, vidros, certos plásticos e borrachas que não são decompostos prontamente.

Os resíduos Classe II B – Não Inertes, são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II A - Inertes, nos termos da NBR 10.004/2004.

Prefere-se neste trabalho entender “resíduo” de forma abrangente, classe I e classe II, como materiais resultantes de processos industriais que requerem disposição, compreendendo os tipos:

- Resíduos combustíveis “de fato”, que contribuem com energia térmica para o processo;
- Aqueles que requerem adição de calor para dar combustão, mas ainda contribuem positivamente para o processo;
- Os que têm pouco ou nenhum poder calorífico contêm substâncias metálicas ou tóxicas, e necessitam degradação térmica para torná-los inertes ou inofensivos antes da disposição;
- Os que têm pouco ou nenhum poder calorífico, cuja composição contribui com algum elemento básico das matérias-primas naturais utilizadas no processo.

2.2. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA

2.2.1. Âmbito Federal

Coimbra (2003) defende a importância da legislação como instrumento necessário para garantir os direitos e interesses da coletividade, dos indivíduos e diferentes grupos sociais. Argumenta que se ela impede o ilícito, também liberta as iniciativas de quem respeita o bem comum e as condições para o desenvolvimento harmônico das pessoas e das comunidades. Comenta que para atender seu objetivo a legislação deve ser elaborada, aplicada, atualizada e postula que o avanço de um país se mede pelo estágio da sua legislação ambiental e respectiva prática.

Em sintonia com esse espírito pretende-se traçar uma brevíssima revisão histórica da legislação ambiental brasileira que trata de resíduos e emissões atmosféricas, apresentando alguns instrumentos no âmbito federal. Serão também abordados alguns aspectos das legislações ambientais norte-americanas e

européias relacionadas à atividade de co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer para cimento.

2.2.1.1. A Constituição da República Federativa do Brasil

Título VIII, Capítulo VI - Do Meio Ambiente no artigo 225 estabelece que:

“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade, o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”.

Em compasso com o espírito preconizado pelo instrumento jurídico maior da Federação, buscar-se-á a abordagem sucinta de tópicos da legislação que ilustrem sua amplitude e complexidade as quais motivam especialistas a classificá-la como avançada, por vezes exemplar (COIMBRA, 2003). Serão enfocados aspectos relativos às diretrizes fixadas para o estabelecimento de padrões de emissão e de qualidade ambiental para poluentes atmosféricos e outros relacionados ao gerenciamento de resíduos sólidos.

2.2.1.2. Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA)

Lei nº. 6.938, de 31 de agosto de 1991. A mais importante lei ambiental. Anteriormente à edição da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), outros regulamentos foram publicados visando o controle ambiental, porém, sem a abrangência deste dispositivo. É instrumento fundamental para a definição das diretrizes do sistema de controle ambiental. Contempla, incentiva e respalda a busca por soluções tecnológicas visando à racionalização do uso de recursos naturais, dentre as quais se insere o objeto deste estudo. Define também que o poluidor é obrigado a indenizar os prejuízos ambientais que causar, independentemente de culpa. O Ministério Público (Promotor de Justiça ou Procurador da República) pode propor ações de responsabilidade civil por danos ao ambiente, impondo ao poluidor a obrigação de recuperar e/ou indenizar prejuízos causados. Também essa lei criou os Estudos e respectivos Relatórios de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), regulamentados em 1986 pela Resolução nº 001/86 do CONAMA. O EIA/RIMA deve

ser realizado antes da implantação de atividades econômicas que afetem significativamente o ambiente como estradas, indústrias ou aterros sanitários devendo detalhar os impactos positivos e negativos que possam ocorrer devido às obras ou após a instalação de empreendimento, mostrando como evitar os impactos negativos. Se não for aprovado, o empreendimento não poderá ser implantado. A lei dispõe ainda sobre o direito à informação ambiental.

2.2.1.3. Lei de Crimes Ambientais

Lei nº. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente.

2.2.1.4. Legislação Federal Para Resíduos Sólidos

Portaria Minter nº. 53, de 1 de Março de 1979, estabelece exigências para acondicionamento e destinação de resíduos sólidos domiciliares. Recomenda a não incineração a céu aberto, tolerando-a em situações de emergência sanitária para “incinerar” resíduos sólidos ou semi-sólidos de qualquer natureza.

Norma NBR 7101 de junho de 1989 – “Transporte de produtos perigosos – Terminologia” da ABNT, define os termos empregados no transporte de produtos perigosos. Para sua aplicação é necessário consultar as demais normas referentes ao transporte de carga perigosa.

Norma NBR 12235 de abril de 1992 – “Armazenamento de resíduos sólidos – Procedimento” da ABNT, fixa as condições exigíveis para o armazenamento de resíduos sólidos perigosos (Classe I), visando à proteção da saúde pública e meio ambiente.

Resolução CONAMA nº. 009, de 31 de agosto de 1993, dispõem sobre o gerenciamento de óleos lubrificantes em razão de seu uso prolongado resultar na formação de compostos que lhe conferem periculosidade por apresentar toxicidade, requerendo medidas que evitem danos à saúde e ao meio ambiente. Estabelece a obrigatoriedade de que todo óleo lubrificante usado seja destinado à reciclagem, sendo passível de autorização para combustão, visando o aproveitamento energético, quando inviável a reciclagem. Proíbe o descarte de óleos usados em quaisquer compartimentos

ambientais, bem como a industrialização e comercialização de novos óleos lubrificantes não recicláveis, nacionais ou importados.

Resolução CONAMA nº. 023, de agosto de 1996 proíbem a importação de resíduos perigosos (Classe I), devido aos riscos reais e potenciais à saúde e ao meio ambiente. Estabelece procedimento para importação de itens da categoria resíduos não inertes (Classe II A) somente para finalidades de reciclagem ou reaproveitamento mediante autorização do IBAMA e anuência do Órgão Estadual de Meio Ambiente.

Norma NBR 13741 de novembro de 1996 - “Destinação de bifenilas policloradas – Procedimento” da ABNT, fixa as condições exigíveis para a destinação de PCB's e resíduos contaminados com PCB's. Especifica que resíduos no estado físico sólido, sem líquidos livres, contendo concentrações de PCB's menores ou iguais a 50 mg/kg podem, a critério do órgão de controle ambiental, ser dispostos em aterros industriais de resíduos perigosos (Classe I).

Norma NBR 8371 de junho de 1997 – “Ascarel para transformadores e capacitores – Características e riscos” da ABNT, descrevem os ascaréis para transformadores e capacitores, suas características e riscos, e estabelece orientações para manuseio, acondicionamento, rotulagem, armazenamento, transporte, procedimentos para equipamentos em operação e eliminação.

Norma NBR 13882 de junho de 1997 – “Líquidos isolantes elétricos - Determinação do teor de bifenila policlorada (PCB)” da ABNT, prescreve métodos para a determinação do teor de PCB em líquidos isolantes elétricos, sendo aplicável a teores de PCB a partir de 3 mg/kg.

Resolução CONAMA nº. 257, de 30 de junho de 1999 – dispõe sobre a obrigatoriedade dos estabelecimentos que comercializam ou prestam assistência técnica referente a pilhas e baterias que contenham chumbo, cádmio, mercúrio e seus compostos, a aceitarem a devolução das unidades usadas após seu esgotamento energético. Elas devem ser mantidas adequadamente armazenadas até a devolução aos fabricantes e importadores para reutilização, reciclagem, tratamento ou disposição final.

Resolução CONAMA nº. 258, de 26 de agosto de 1999 – dispõe sobre a obrigatoriedade das empresas fabricantes e importadoras de pneumáticos de coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis no território nacional. Estabelece os prazos e proporções anuais de coleta relativos às

quantidades fabricadas e/ou importadas por constituírem passivo ambiental que resulta em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública e da impossibilidade de seu integral reaproveitamento para uso veicular e em processos de reforma.

Norma NBR 13221 de novembro de 2000 – “Transporte de resíduos” da ABNT, especifica as condições necessárias de forma a evitar danos ao meio ambiente e para proteção da saúde pública. Aplica-se ao transporte de resíduos, por meio terrestre, inclusive daqueles materiais que possam ser reaproveitados, reciclados e/ou reprocessados. Não se aplica aos materiais radioativos e aos transportes aéreo, hidroviário e marítimo, assim como transporte interno, numa mesma área do gerador.

Resolução CONAMA nº. 307, de 05 de julho de 2002 – estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias para minimizar os impactos ambientais da disposição em locais inadequados.

Resolução CONAMA nº. 313, de 29 de outubro de 2002 dispõe sobre a realização do Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais para obter informações precisas da quantidade, tipos e destino dos resíduos gerados no parque industrial brasileiro. Visa à elaboração dos Programas Estaduais e do Plano Nacional para Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais.

Norma NBR 10004 de maio de 2004 – “Resíduos sólidos – Classificação” da ABNT, classifica os resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ter manuseio e destinação adequados. Os resíduos radioativos não são objetos desta Norma, pois são de competência exclusiva da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Norma NBR 10005 de maio de 2004 – “Lixiviação de resíduos – Procedimento” da ABNT, fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos da classe I – perigosos – e classe II – não perigosos.

Norma NBR 10006 de maio de 2004 – “Solubilização de resíduos - Procedimento” da ABNT, fixa os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos da classe II A – não inerte – e classe II B – inertes.

Norma NBR 10007 de maio de 2004 – “Amostragem de resíduos – Procedimentos” da ABNT, fixa as condições exigíveis para amostragem, preservação e estocagem de amostras de resíduos sólidos.

2.2.1.5. Legislação Federal para limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas

RESOLUÇÃO CONAMA Nº 382, DE 26 DE DEZEMBRO DE 2006 – Considerando a crescente industrialização de várias regiões do país com o conseqüente aumento do nível de emissões atmosféricas e da degradação da qualidade do ar, resolve estabelecer limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para seguintes fontes fixas:

Processos de geração de calor a partir da combustão externa de óleo combustível; da combustão externa de gás natural; da combustão externa de bagaço de cana-de-açúcar; da combustão externa de derivados da madeira; turbinas à gás para geração de energia elétrica; processos de refinarias de petróleo; processos de fabricação de celulose; processos de fusão secundária de chumbo; processos da indústria de alumínio primário; fornos de fusão de vidro; produção de fertilizantes, ácido fosfórico, ácido sulfúrico e ácido nítrico; indústrias siderúrgicas integradas e semi-integradas e usinas de pelotização de minério de ferro e indústria do cimento portland, sendo que neste caso, está citado no item 1.1 que os limites de emissão de poluentes decorrentes do co-processamento de resíduos em forno clínquer serão objeto de resolução específica, e nesse caso essa resolução esta se referindo ao CONAMA 264/99, referenciado na página 34.

2.2.1.6. Legislação Federal para destruição térmica de resíduos perigosos

NBR 11175 de julho de 1990 - “Incineração de resíduos sólidos perigosos – Padrões de desempenho – Procedimento” da ABNT fixa as condições exigíveis de desempenho do equipamento para incineração de resíduos perigosos, exceto aqueles assim classificados por patogenicidade ou inflamabilidade e estabelece os limites de emissão (Tabela 2). Define como principais compostos orgânicos perigosos (PCOP's) de um resíduo as substâncias da listagem nº 4 da NBR 10004 (ABNT, 2004) para servirem como indicadores da eficiência de destruição e remoção.

Tabela 2: Limites de emissão atmosférica (LE) para o co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer

POLUENTES	Legislação Estadual - RJ	Legislação Federal	Legislação Federal	Legislação Estadual - SP	Norma Técnica Federal	Diretiva do Conselho Europeu
	NT -574	CONAMA N° 264/99	CONAMA N° 316/02	CETESB P4.263/03	NBR 11175/90	200/76
Monóxido de Carbono-CO	50 mg/Nm ³	100 ppm ⁽²⁾	100 ppm	-	100 ppm	-
THC (expresso como propano)		20 ppm ⁽²⁾	-	20 ppm	-	10 mg/Nm ³
Material Particulado(MP)	50 mg/Nm ³	70 mg/Nm ³ ⁽¹⁾	100 mg/Nm ³	70 mg/Nm ³	70 mg/Nm ³	30 mg/Nm ³
NOx (medido como NO ₂)	560 mg/Nm ³	- ⁽³⁾	560 mg/Nm ³	800 mg/Nm ³	560 mg/Nm ³	800 mg/Nm ³
SOx (medido como SO ₂)	100 mg/Nm ³	- ⁽³⁾	280 mg/Nm ³	350 mg/Nm ³	280 mg/Nm ³	50 mg/Nm ³

(1) Parâmetro MP deve ser corrigido a 11% de oxigênio em base seca (CONAMA nº 264/99).

(2) Parâmetros THC e CO devem ser corrigidos a 7% de oxigênio em base seca (CONAMA nº 264/99).

(3) Parâmetros SO_x, NO₂, limites e correção de oxigênio deverá ser fixados pelos Órgãos Ambientais competentes, considerando as peculiaridades regionais(CONAMA nº 264/99).

Fonte: BRASIL (1999a), adaptada pelo autor.

Resolução CONAMA nº. 264, de 26 de Agosto de 1999 dispõe sobre os procedimentos, critérios e aspectos técnicos para o licenciamento ambiental, para co-processamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer e para cimento, excetuando os resíduos domiciliares brutos, de serviços de saúde, radioativos, explosivos, organoclorados, agrotóxicos e afins. Estabelece que as solicitações para co-processamento em unidades industriais existentes somente serão analisadas se estiverem licenciadas e ambientalmente regularizadas para a produção por processos convencionais. Essa norma prevê a concessão da autorização para o co-processamento desde que as quantidades de resíduos gerados e/ou estocados sejam suficientes para justificar sua utilização como substitutos parciais de matérias-primas e/ou de combustíveis, de forma a impedir a utilização do procedimento com o propósito de dar fim a passivos, sob pretexto de execução dos testes exigíveis.

O procedimento de licenciamento ambiental contempla a concessão das Licenças Prévia (LP), de Instalação (LI) e de Operação (LO) para as plantas novas ou existentes. Exige a apresentação de estudos tecnicamente fundamentados demonstrando a viabilidade de queima do(s) resíduo(s) (EVQ); os planos de teste em branco (PTB) e de queima (PTQ); os relatórios com os resultados obtidos nos testes em branco (TB) e de queima (TQ) realizados e o relatório do estudo de análise de risco (EAR).

O teste em branco é definido como:

Conjunto de medições no forno em funcionamento normal, operando sem a alimentação de resíduo, para avaliar as compatibilidades das condições operacionais das instalações de produção de clínquer com atendimento aos limites de emissões definidas na presente resolução e com as exigências técnicas fixadas pelo órgão ambiental.

O teste de queima é definido como:

Conjunto de medições no forno em funcionamento normal, operando com a alimentação de resíduo, para avaliar as compatibilidades das condições operacionais das instalações de produção de clínquer com atendimento aos limites de emissões definidas na presente resolução e com as exigências técnicas fixadas pelo órgão ambiental.

A norma estabelece que a capacidade de operação prevista para o co-processamento de resíduos deve ser mantida durante os testes em branco e de queima com uma variação aceitável de até 10%. É prevista a possibilidade de realização de um período de "pré-teste de queima", que deverá ser aprovado pelo Órgão Ambiental, para efetuar os ajustes necessários da planta industrial às condições de alimentação dos resíduos a serem testados.

Como pré-requisito para a realização do teste de queima deverá estar instalado e em operação o sistema de intertravamento para interrupção automática da alimentação de resíduos, o qual será testado antes do início das medições. As hipóteses de falhas contemplam a emissão de poluentes monitorados continuamente, acima dos limites estabelecidos; queda da temperatura normal de operação; queda do teor de O_2 no sistema; interrupção do funcionamento do equipamento de controle de poluição; entre outras.

Durante o teste de queima é exigida a realização do teste com o PCOP (Principal Composto Orgânico Perigoso) selecionado para avaliação da Eficiência de Destruição e Remoção (EDR) de orgânicos, que deve atingir, no mínimo, 99,99%. Os limites de emissão estabelecidos (Tabela 2) não devem ser ultrapassados durante a operação do forno com combustíveis convencionais, nem quando utilizando resíduos.

O limite de 100 ppm para o monóxido de carbono (CO) poderá ser excedido desde que os valores medidos de hidrocarbonetos totais (HCT) não

excedam 20 ppm (medidos como propano – C_3H_8), em termos de média horária, e que não seja ultrapassado o limite superior de CO de 500 ppm, corrigido a 7% de O_2 (base seca – bs), em qualquer instante. O limite de CO para o intertravamento da alimentação de resíduo deve ser fixado a partir dos Testes de Queima, com base nas médias horárias e corrigido continuamente a 7% de O_2 (base seca).

O Estudo de Análise de Risco (EAR) tem por objetivo identificar as características de perigo das instalações, bem como das atividades a serem desenvolvidas na planta industrial para identificação qualitativa e quantitativa dos riscos associados e a possibilidade de adoção de medidas de mitigação que possam torná-los assimiláveis, tanto do ponto de vista ambiental como da saúde pública.

A norma estabelece que os limites de emissão podem ser mais restritivos a critério dos órgãos ambientais locais, em função de fatores relacionados à capacidade de dispersão atmosférica dos poluentes, considerando as variações climáticas e de relevo locais ou a intensidade de ocupação industrial e os valores de qualidade de ar da região. Os limites de emissão para os parâmetros SO_x e NO_x devem ser fixados pelos órgãos ambientais locais considerando as peculiaridades regionais. Este regulamento também não estabelece limite mínimo de poder calorífico para os resíduos a serem co-processados em fornos de clínquer.

Segunda CONAMA 264/99, deverão ser monitorados, de forma contínua, os parâmetros pressão interna, temperatura dos gases do sistema-forno e na entrada do precipitador eletrostático, vazão de alimentação do resíduo, material particulado (através de opacímetro), O_2 , CO, NO_x e/ou THC, quando necessário e, de forma não contínua, os parâmetros SO_x , PCOP's, HCl/ Cl_2 , HF, elementos e substâncias inorgânicas.

A Resolução aborda também as Unidades de Mistura e Pré-condicionamento de resíduos, estabelecendo os procedimentos para controle de recebimento, armazenamento e transporte de resíduos, treinamento de pessoal e do estudo de análise de risco.

Resolução nº. 316, de 29 de outubro de 2002 dispõe sobre os procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos e cadáveres, estabelecendo procedimentos operacionais, limites de emissão e critérios de desempenho, controle, tratamento e disposição final de efluentes, para minimizar os impactos ao meio ambiente e à saúde pública resultantes dessas atividades.

Excetua os rejeitos radioativos, que devem seguir normatização específica da CNEN e o co-processamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer que deve atender ao disposto na Resolução CONAMA nº 264/99 (MANTEGAZZA, 2004), salvo disposição sobre dioxinas e furanos.

2.3. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL – AMERICANA

2.3.1. Destruição térmica de resíduos perigosos

Oppelt (1986) refere que os primeiros padrões federais americanos para o controle das emissões aplicáveis à incineração foram estabelecidos para os incineradores municipais sob as provisões do New Source Performance Standard (NSPS). Posteriormente a U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) fixou regras mais restritivas requerendo também o uso de técnicas de boas práticas de combustão caracterizadas por um conjunto de procedimentos que resultavam na combustão mais eficiente com a minimização da geração de produtos indesejados.

A legislação federal americana está disponível no ELETRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS (e-CFR, 2003) composto por 50 Títulos, sendo o de nº 40 destinado à Proteção do Meio ambiente. Esse Título é composto por vários volumes divididos em capítulos, sub-capítulos, partes e sub-partes, tratando-se de uma complexa coletânea de regulamentos e procedimentos.

2.3.2. Padrões para Controle de Emissões Orgânicas

O regulamento define que um forno de clínquer queimando resíduos perigosos como combustível suplementar deve atingir a EDR de 99,99% para todos os constituintes orgânicos perigosos presentes no resíduo alimentado.

Para demonstrar essa conformidade a EDR de 99,99% deve ser obtida em teste de queima para cada PCOP (principais compostos orgânicos perigosos) selecionado. Os PCOP's são definidos baseados no grau de dificuldade de destruição dos constituintes orgânicos do resíduo e na concentração ou massa deles no resíduo alimentado.

2.3.3. Destruição de produtos de combustão incompletas (PIC's)

Wagner (2004) afirma que embora o padrão de eficiência de destruição e remoção de orgânicos busque assegurar a adequada destruição dos PCOP's no forno de clínquer, pode haver uma significativa quantidade de PIC's nas emissões lançadas na atmosfera se adequadas condições de combustão não forem garantidas.

A USEPA define PIC's como compostos orgânicos não queimados que estavam presentes no resíduo, produtos de decomposição térmica resultantes de constituintes orgânicos no resíduo ou compostos sintetizados durante ou imediatamente após a combustão.

Wagner (2004) refere que os PIC's são controlados pela fixação de limites para os parâmetros que assegurem a operação do equipamento em boas condições de combustão. Para obter essa garantia foram estabelecidos padrões de operação baseados no monitoramento dos níveis de monóxido de carbono (CO) e de hidrocarbonetos totais (THC).

2.4. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL - COMUNIDADE EUROPÉIA

2.4.1. Destruição térmica de resíduos

Foi efetuada pesquisa na Internet acerca da legislação ambiental da Comunidade Européia (CE), direcionada, principalmente, às referências contidas na norma atual que regulamenta a incineração e co-incineração de resíduos. Verificou-se que a CE, a exemplo dos casos brasileiro e americano, dispõe de vasta legislação ambiental destacando-se uma Diretiva de 1975 (EUROPEAN COUNCIL, 1975), que alertava os países membros para a necessidade de adoção de medidas que estimulassem a prevenção, reciclagem e processamento de resíduos para recuperação de matérias-primas e, possivelmente, de energia.

São várias normas direcionadas à classificação, transporte, gerenciamento, tratamento e disposição de resíduos, outras tantas para limitação das emissões de poluentes atmosféricos, fixação de padrões de qualidade do ar, avaliação e gerenciamento, bem como regulamentação que assegure o livre acesso público às informações das condições ambientais.

Com relação à destruição térmica de resíduos destaca-se a Diretiva 94/67/EC de 16 de dezembro de 1994 (EUROPEAN COUNCIL, 1994) direcionada a propiciar os meios e processos para prevenir, ou onde isto não fosse praticável, reduzir, tanto quanto possível, os efeitos negativos sobre o meio ambiente e os riscos resultantes para a saúde humana, decorrentes da incineração de resíduos perigosos.

2.5. INDÚSTRIAS CIMENTEIRAS

2.5.1. Breve histórico

Tecnicamente, pode-se definir cimento como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, o cimento Portland não se decompõe mais (ABCP, 2006).

As ruínas romanas, as pirâmides egípcias e as muralhas da China provam que no século V antes de Cristo, esses povos já empregavam uma espécie de aglomerante entre os blocos de pedras na construção de seus monumentos (ABCP, 2006).

Posteriormente, os gregos e os romanos passaram a usar um material proveniente da queima de um gesso impuro, composto de calcário calcinado e cinzas vulcânicas. No entanto, guardavam em segredo as fórmulas de seus cimentos que, com o declínio de suas civilizações ficaram perdidos no tempo.

Assim, na Idade Média houve uma piora na qualidade dos cimentos e esse material praticamente teve que ser desenvolvido novamente.

Foi em 1758 que o inglês Smeaton conseguiu um produto de alta resistência por meio da calcinação de calcários moles e argilosos, a baixas temperaturas. Em 1818, o francês Vicat obteve resultados semelhantes ao de Smeaton pela mistura de componentes argilosos e calcários e foi considerado o inventor do cimento artificial (ABCP, 2006).

Outro inglês, Joseph Aspdin, se dedicou ao estudo da qualidade do cimento definindo proporções mais adequadas das matérias primas e calcinando em temperaturas mais altas (em torno de 800°C). Em 1824 patenteia o "Cimento Portland", que recebe este nome por apresentar cor e propriedades de durabilidade

e solidez semelhantes às das rochas da ilha britânica de Portland (ABCP, 2003). O cimento Portland é, portanto, uma combinação química pré-determinada e bem proporcionada, de cálcio, sílica, ferro e alumínio, sujeito a um processo de fabricação complexo, rigorosamente controlado e abarcando uma grande variedade de operações.

A primeira tentativa de aplicar os conhecimentos relativos à fabricação do cimento Portland no Brasil ocorreu aparentemente em 1888, quando o comendador Antônio Proost Rodovalho empenhou-se em instalar uma fábrica em sua fazenda em Santo Antônio, Estado de São Paulo. Posteriormente, várias iniciativas esporádicas de fabricação de cimento foram desenvolvidas (ABCP, 2006).

No entanto, a produção de cimento Portland brasileiro iniciou-se, de fato em 1926 com a Cia Brasileira de Cimento Portland Perus (ABCP, 2006).

Desde então, salvo algumas épocas, a fabricação de cimento não parou de crescer.

Segundo a ABCP (2007), o Brasil é um dos oito maiores produtores de Cimento Portland do mundo e detém uma das mais avançadas tecnologias no fabrico deste insumo. A evolução da produção de cimento Portland de 1970 a 2006 pode ser observada no gráfico da Figura 1.

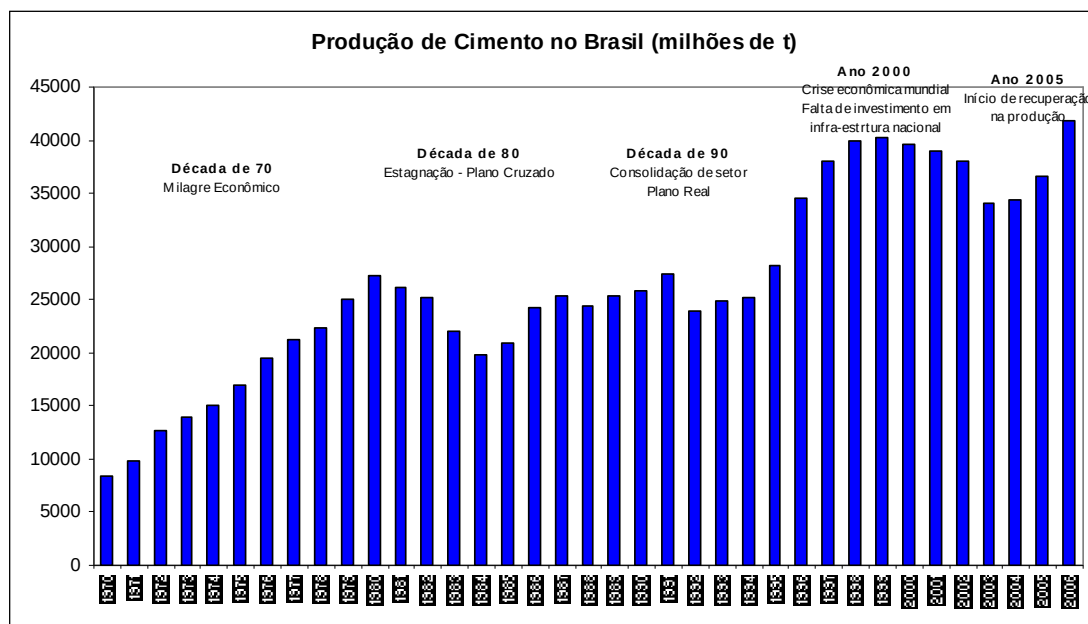


Figura 1 – Evolução da produção de Cimento Portland de 1970 a 2006 (Fonte: SNIC 2007)

Em 2006, o cimento era produzido nas 5 regiões do país destacando-se a região sudeste como o maior produtor nacional com 52,4%, seguido por nordeste (19,8%), sul (13,3%), centro oeste (11%) e o norte com 3,5%. A produção de cimento, em 2006, foi de 41.873.602 ton, o que representa um crescimento de 14,2% em relação ao ano anterior (SNIC, 2006).

Em 2006 o setor de cimento brasileiro reunia 10 companhias, responsáveis pela operação de 58 fábricas, conforme a distribuição abaixo (SNIC, 2006).

Os principais grupos responsáveis pela produção de cimento no Brasil são: Grupo Votorantim (41,87%), Grupo João Santos (11,42%), Grupo Cimpor (9,03%), Grupo Holcim (8,93%), Lafarge (8,32%), Grupo Camargo Correia (8,07%), seguidos pelos grupos Tupi (3,66%), Soeicom (2,96%), Itambé (2,21%), Ciplan (1,76%), Ribeirão Grande (1,70%) e Cibrex (0,05%) (SNIC, 2007).

O Brasil importou uma quantidade relativamente baixa de cimento no ano de 2006, atingindo 202.491 ton contra 223.452 ton, uma redução de 1% em relação ao ano anterior. Do total Importado, 196.023 ton corresponderam aos cimentos “Portland” comuns e 6.468 ton aos cimentos “Portland” brancos. As importações do cimento “Portland” comum procederam do Uruguai (92964 ton), Cuba (45485 ton) e Venezuela (57.574 ton). Os cimentos “Portland” brancos são provenientes do México (3.171 ton) e Espanha (3054 ton) e Bélgica 243(SNIC, 2007).

As exportações, em 2006, atingiram 1.041.370 ton de cimento, representando 2,4% da produção nacional. As exportações de cimento destinaram aos Estados Unidos (54%), Congo (13,84%), Paraguai (12%), Cabo Verde (7,63%), Curaçao (10,8%) e Namíbia (5,85%) (SNIC, 2007).

Essa indústria se caracteriza pela tendência ao consumo interno, devido ao baixo valor do produto e seu caráter perecível, ocorrendo, por conseguinte, baixo volume de trocas internacionais. (SNIC, 2007).

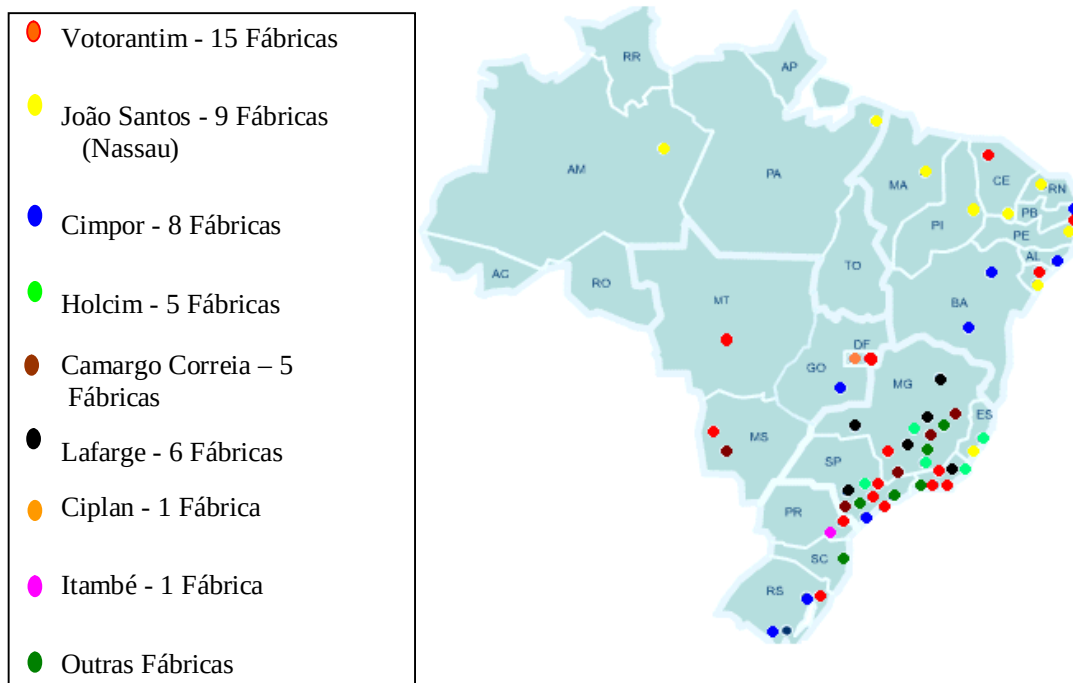


Figura 2 – Principais produtores de cimento do Brasil e localização das fábricas (SNIC, 2007).

O consumo aparente de cimento, em 2006, registrou crescimento de 14,6% em relação ao ano anterior, passando de 35.645.000 ton para 40.863.347 ton. O consumo per capita de cimento no Brasil aumentou de 194 kg/habitante para 219 kg/habitante um aumento de 12,8% abaixo da Espanha (681 kg/hab), Japão (626 kg/hab), Itália (586 kg/hab), Alemanha (419 kg/hab), China (404 kg/hab) e Estados Unidos (359 kg/hab). Em 2006, grande parte da produção brasileira de cimento foi consumida nos Estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Goiás e Bahia (SNIC, 2007).

Na tabela 3 observa-se o resumo da descrição acima.

Tabela 3 – Dados de produção importação, exportação, consumo aparente e preço médio do cimento nos anos de 2001 a 2006 em milhões de ton

Discriminação	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Produção	39	39	34	34	36	42
Importação	0,134	0,145	0,223	0,253	0,223	0,202
Exportação	0,126	0,101	0,418	0,552	0,922	1
Consumo Aparente (1)	0,38	0,37	0,33	0,34	0,35	0,41
Preço Médio(R\$/ton)	70	56	74	65	55	50
Fontes: SNIC						
Notas: (1) Produção - Importação - Exportação						

Alguns países vêm apresentando forte crescimento em sua produção, como China e Índia, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Produção mundial capacidade produtiva de clínquer e cimento em milhões de ton

Países	Produção de cimento						Capacidade de Clínquer					
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2000	2001	2002	2003	2004	2005
China	575	627	705	750	850	1.000	570	550	700	730	750	850
Índia	95	100	100	110	110	130	100	31	120	120	130	150
Estados Unidos	88	89	90	91	96	99	78	78	82	82	102	106
Japão	79	77	72	72	89	66	95	90	90	90	78	74
Coréia do Sul	50	52	58	58	60	50	57	59	62	62	62	62
Brasil	40	39	39	34	34	36	45	44	45	45	45	45
Rússia	30	36	39	40	46	45	63	85	66	85	65	65
Itália	35	40	40	40	38	38	48	46	48	48	48	46
Espanha	30	41	43	40	40	48	40	40	40	40	40	40
Tailândia	38	28	32	35	35	40	24	48	47	50	50	50
Turquia	33	30	33	33	34	38	32	33	35	35	35	35
Indonésia	27	31	33	34	30	37	40	40	50	50	50	42
México	30	30	31	32	35	36	43	37	40	40	40	40
Alemanha	37	29	30	28	28	32	42	22	31	31	31	31
Outros Países	510	450	460	480	380	392	430	510	450	470	350	346
TOTAL	1.700	1700	1.800	1.964	1.905	2270	1.700	1.700	1.900	1.950	1.876	2120

Fonte: Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC)

Segundo dados da SNIC, a América Latina é responsável por cerca de 7% da produção mundial, estando o Brasil na posição de líder, seguido pelo México.

2.5.2. Produção de clínquer e cimento Portland

Conforme descrito por Wittmann e Koester (1988) a manufatura do clínquer para cimento é um processo que envolve o manuseio de grandes quantidades de materiais que passam por redução de tamanho, mistura,

combinação e reações termoquímicas. Para que ocorram as reações são utilizadas enormes quantidades de matéria-prima e de energia para atingir as altas temperaturas necessárias à formação das fases do clínquer. Essas altas temperaturas dependem das condições de queima dos combustíveis no maçarico principal do forno e, quando disponível, no pré-calcinador. Wittmann e Koester (1988 *apud* MANTEGAZZA, 2004, p.104).

Devido a essas características considerou-se conveniente apresentar algumas informações básicas sobre o processo de combustão, preliminarmente à apresentação das etapas de manufatura do clínquer para cimento.

2.5.3. Processo de combustão

A combustão é uma reação química rápida entre um combustível e um oxidante, normalmente o oxigênio puro ou do ar atmosférico, em condições ideais de temperatura e pressão, que resulta em intenso desprendimento de energia na forma de calor e luz (LIMA, 1974).

Uma reação química consiste em modificações da arquitetura molecular de um elemento ou composto alterando as suas propriedades e resultando na formação de outros compostos. Para que o processo de combustão ocorra, algumas condições devem ser previamente satisfeitas, como por exemplo: o combustível precisa ser aquecido até atingir a temperatura de ignição. Nessa temperatura ocorre maior atividade cinética molecular a qual depende do meio em que se desenvolve a combustão. A pressão de trabalho é um dos fatores mais importantes para atingir a temperatura de ignição.

Havendo disponibilidade de uma mistura conveniente do combustível e do oxigênio, em temperatura e pressão adequadas, o processo tem início. A partir desse momento e com o processo atingindo uma temperatura superior à de ignição, a reação passa a se realizar naturalmente com grande desprendimento de energia e tornando-se auto-sustentável.

2.5.4. Combustão no forno de clínquer

Os fornos rotativos para produção de clínquer são fornalhas cilíndricas de aço carbono com dimensões aproximadas de 3 m a 8 m de diâmetro e de 50 m a 230 m de comprimento dispendo de motores elétricos de acionamento para

promover o movimento giratório em seu eixo longitudinal na faixa de 1 rpm a 3 rpm. São montados levemente inclinados em relação a horizontal (2,5% a 4,5%), revestidos com material refratário altamente resistente à temperatura para proteção do casco e para proporcionar a retenção do calor no interior da fornalha. O calor é gerado pela queima dos combustíveis selecionados através do maçarico principal do forno instalado na extremidade mais baixa, podendo-se também utilizar queimadores secundários (THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION (CEMBUREAU), 1999; U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), 1994). A título ilustrativo é apresentada, na Figura 3 uma chama típica obtida na zona de queima primária de forno rotativo de produção de clínquer.

Acerca do queimador, Maringolo (2001) comenta que:

O queimador simples ou de múltiplos canais alinhados paralelamente ao eixo longitudinal do forno, posicionado no centro da secção transversal deste, deve ser capaz de realizar combustão completa em presença de baixo excesso de ar (secundário) e com geração mínima de CO e NO_x produzindo uma chama curta estreita e fortemente radiante para uma boa transferência de chama para o material na zona de Sinterização do forno (MARINGOLO, 2001, p 37).



Figura 3 – Vista parcial da zona de queima primária de um forno de clínquer com resfriador de satélites

Fonte: Fotografia cedida pela Fábrica de Cimento RJ

Smart, Mullinger e Jenkins (1998) relatam que fornos rotativos são utilizados em muitos processos industriais, porém, de longe a grande usuária é a indústria cimenteira, a qual opera em torno de 2.000 equipamentos em todo o mundo. Citam que a química da oxidação de combustíveis hidrocarbonetos é muito

complexa e que nenhuma reação pode ocorrer até que o oxigênio do ar entre em contato com o combustível. Como resultado, todo o processo de combustão ocorre conforme as etapas seguintes:

- Mistura;
- Ignição;
- Reação química, e
- Dispersão dos produtos. Smart, Mullinger e Jenkins (1998, *apud* MANTEGAZZA, 2004, p.106)

Os autores também referem que a velocidade global da combustão é dependente do estágio mais lento dentre os referidos. Na maioria dos sistemas de combustão industrial a mistura é lenta enquanto que as outras etapas são muito rápidas. Comentam ainda que a combustão e a sua integração no projeto do equipamento de transferência de energia é o mais complexo de todos os problemas de engenharia de processo, requerendo, simultaneamente as soluções para as transferências de calor, de massa e de momento.

Greco (1996) também menciona que o controle do processo de produção em fornos rotativos é assunto extremamente complexo da tecnologia de combustão. Refere que inúmeras reações químicas em diferentes graus de intensidade, tanto em fase gasosa, líquida e sólida, altas temperaturas, radiação térmica, elevadas taxas de troca de calor e de massa e escoamentos multi-fásicos tornam extremamente difícil a modelagem, o acompanhamento e o controle desse processo.

Cita que o comportamento de um forno rotativo é muito influenciado pelas características das matérias-primas, pelos perfis de temperatura, pelas taxas de troca de calor por radiação e convecção, pelas velocidades relativas dos fluxos nos três eixos, pelas concentrações das substâncias geradas ou introduzidas entre outros fatores.

Defendido por Menon et al. (1993a) acerca dos combustíveis utilizados nos fornos rotativos, considera que além de serem economicamente viáveis devem também possuir características físico-químicas compatíveis com as exigências de combustão do processo. O autor cita que os combustíveis devem possuir poder calorífico inferior (pci) de, no mínimo, 18 800 kJ/Kg (4 490 kcal/kg), para que possa ser obtida a temperatura mínima necessária na zona de sinterização ou de queima.

A qualidade do produto é muito influenciada pelos parâmetros de controle do processo em decorrência de uma relação íntima entre equipamentos, combustíveis e materiais utilizados. Os combustíveis empregados devem possuir componentes químicos que tenham pouca ou nenhuma influência negativa na composição final do clínquer, garantindo a sua qualidade e a possibilidade de gerar um tipo característico de chama, de acordo com cada tipo de combustível consumido.

A distribuição de propriedades em um forno rotativo, tais como: temperatura, concentração, velocidade, entre outras, pode afetar as características finais do clínquer. O processo de fabricação requer zonas de aquecimento e de resfriamento primário do material com ritmos adequados para a obtenção da estrutura cristalina desejável. O não atendimento a essas condições poderá resultar na formação de cristais com características inadequadas, aumentando os custos de moagem e alterando a qualidade do produto final (MENON et al., 1993a; GRECO, 1996).

Obviamente tais questões interessam e muito aos empreendedores em face da necessidade de manutenção da qualidade do cimento, bem como para o controle de seu custo final, em um processo já intensivo de uso de energia. Os custos de transformação da matéria-prima podem também ser otimizados mediante a operação do equipamento dentro das condições ideais de processamento. O fluxo de calor no forno, como resultado das condições de combustão, além de interferir na qualidade do clínquer tem consequência direta no consumo do combustível. Com o controle da chama pode-se obter uma economia de até 5% do combustível que seria consumido se fosse usado um queimador não conjugado à aerodinâmica do forno (MENON et al., 1993a).

Acerca da redução dos custos de produção, Maringolo (2001), refere que a indústria americana entre os anos de 1973 a 1987 promoveu o corte de 39% no número de homens/hora gastos na produção de 1 000 t de cimento e que em relação à energia ocorreu a redução de 28% entre os anos de 1973 a 1988. Comenta que, de 1989 a 1995, essa tendência de redução foi nivelada para ambos os parâmetros e que tais valores se mantêm mais ou menos constantes.

O autor afirma que:

Esse nivelamento que a otimização do processo se aproxima das limitações impostas pelas leis da termodinâmica, representa um grande desafio para indústria do cimento, pois, implementados os cortes de pessoal e ganhos de eficiência, resta apenas ajustes menores a ser feitos e apenas tecnologias inovadoras, como dispositivos para utilização de resíduos industriais, trazer novas reduções nos custos de produção (MARINGOLO, 2001, p.22).

A implementação dessa alternativa repercute positivamente na questão ambiental, seja técnica, associada ao gerenciamento de resíduos, seja como elemento que propicia maior racionalização na exploração e no uso de recursos naturais necessários para a produção do clínquer e cimento.

Sobre essa questão existem relatos, como o mencionado por Kemesis (1993 *apud* MANTEGAZZA, 2004, p.108) acerca da manifestação da Associação de Recicladores em fornos de clínquer dos Estados Unidos de que os custos para obtenção da conformidade ambiental cancelam qualquer benefício extra do uso de resíduos combustíveis. No entanto, essa argumentação deve ser vista com cautela, uma vez que, segundo o autor, surgiu na época em que entidades ambientalistas e proprietários de incineradores acusavam as companhias cimenteiras americanas de se utilizarem das “brechas” na legislação ambiental para efetuar a queima de resíduos em fornos de clínquer sem atender aos rígidos padrões impostos às plantas de incineração.

Ainda sob a ótica dos custos do processo de produção, cabe destacar que a estabilidade na formação da colagem no interior do forno rotativo proporciona a proteção do refratário. Essa proteção é imprescindível, principalmente entre a zona de transição e a zona de queima, contra o desgaste mecânico decorrente da abrasão dos grãos de clínquer, a deformação das chapas metálicas, os ataques químicos pela fase líquida do clínquer e térmicos provocados pela variação de temperatura.

Esse fenômeno altamente desejável e dependente das condições do processo de combustão permite a adequada operação do forno e garante a vida útil operacional do revestimento refratário assim como a integridade do casco do forno. A espessura e a estabilidade da colagem dependem em grande parte das características das matérias-primas, das condições de aquecimento e das temperaturas locais. Parte do alto consumo específico de calor nos fornos rotativos, quer estes trabalhem com pré-aquecedores convencionais ou com pré-calcinadores, se deve às perdas através do casco metálico, as quais aumentam com o desgaste do refratário (MENON e GRECO, 1996).

2.5.5. Processo de fabricação de clínquer e cimento

Como citado, o cimento Portland é um pó fino, cinza ou branco, que consiste de uma mistura de materiais hidráulicos, composto principalmente, por silicatos de cálcio, aluminatos e ferroaluminatos. São conhecidas mais de 30 matérias-primas usadas na produção de cimento Portland as quais podem ser divididas em quatro categorias distintas: calcária, silicosa, argilosa e ferruginosa. Esses materiais são quimicamente combinados para a produção do clínquer e sujeitos às operações mecânicas subsequentes de processamento para a fabricação dos cimentos mencionados (USEPA, 1994).

Os processos de manufatura do clínquer para cimento são consumidores intensivos de energia requerendo energia térmica de 3 200 MJ/t a 5 500 MJ/t de clínquer produzido (764,31 kcal/kg a 1 313,65 kcal/kg) para a calcinação do material cru, em função das matérias-primas e tipos de processos industriais empregados. O consumo de energia elétrica pode variar de 90 kWh/t a 120 kWh/t de cimento na etapa de moagem do clínquer (CEMBUREAU, 1997).

Enquanto a energia térmica é consumida, sobretudo, no processo de clínquerização, incluindo a secagem das matérias-primas, de carvão e de escória de alto forno, a maior parcela da energia elétrica é requerida para a moagem da mistura crua a ser alimentada no forno e do clínquer para a produção do cimento propriamente dito. SPRUNG, (1993, *apud* MANTEGAZA, 2004, p.110).

A energia térmica é tradicionalmente fornecida pela queima de carvão vegetal, carvão mineral, óleo combustível, gás natural e, principalmente, nos dias atuais de coque de petróleo nos maçaricos principal e secundário do sistema-forno.

CEMBUREAU (1999) cita que o desenvolvimento da tecnologia de manufatura do clínquer foi, historicamente, marcado pelas variações entre os processos de via úmida e de via seca com etapas intermediárias caracterizadas por processos de vias semi-úmida e semi-seca. A entidade destaca que os primeiros fornos rotativos instalados por volta de 1895 eram longos de via úmida.

Esses processos permitiam um manejo e homogeneização mais fáceis das matérias-primas, especialmente nos casos em que se apresentavam úmidas e pegajosas ou exibiam grandes flutuações na composição química dos componentes individuais da mistura.

Entretanto, com o desenvolvimento de tecnologias modernas foi possível a preparação de misturas homogêneas sem a adição de água permitindo o uso dos processos de via seca, nos quais a principal vantagem sobre o sistema úmido tradicional é o menor consumo de combustíveis resultando, dessa forma, em um custo de produção mais baixo e menor potencial para emissões atmosféricas ao processo de combustão.

A esse respeito Sprung (1993) destaca que devido ao alto consumo específico de energia, a indústria cimenteira fez consideráveis esforços nos últimos 40 anos (entre as décadas de 50 e 90) para reduzir os custos de produção através da conservação da energia. Ao mesmo tempo essa redução também proporcionou a diminuição da emissão de compostos gasosos, tais como: dióxido de carbono (CO_2), importante gás de efeito estufa. SPRUNG, (1993, *apud* MANTEGAZA, 2004, p.111).

Na Figura 4 é apresentado o desenho esquemático de um forno rotativo de via seca com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones, no qual estão identificados seus principais componentes e indicados os fluxos de material sólido e de gases que se desenvolvem no sistema.

Os processos de produção de clínquer são classificados em quatro categorias por CEMBUREAU (1999, p. 25):

- Via seca;
- Via úmida;
- Via semi-úmida.

O diferencial entre cada um desses processos se refere ao teor de umidade da mistura de matérias-primas básicas e aditivos pré-homogeneizados e moídos para alimentação no forno rotativo. Oportunamente serão discriminadas as matérias-primas utilizadas na produção de clínquer e cimento.

Para o processo de via úmida essa mistura é obtida através da adição de água durante a operação de moagem das matérias-primas em moinho de bolas resultando numa “pasta” com teor de umidade entre 28% a 43%. No processo de via semi-úmida a “pasta” é desidratada em filtro-prensa e a mistura a ser alimentada no forno com umidade entre 16% a 21% é denominada de “torta”.

No processo de via seca as matérias-primas pré-homogeneizadas são alimentadas em moinho de bolas ou de rolos verticais recebendo parte do fluxo de gases quentes gerados no forno, em contracorrente, para secagem e moagem, produzindo a farinha com teor de umidade entre 0,5% a 1%.

Finalmente no processo de via semi-seca adiciona-se água na farinha obtendo-se grânulos com 10% a 12% de umidade denominados pellets que são alimentados em forno que dispõe de grade pré-aquecedora da matéria-prima.

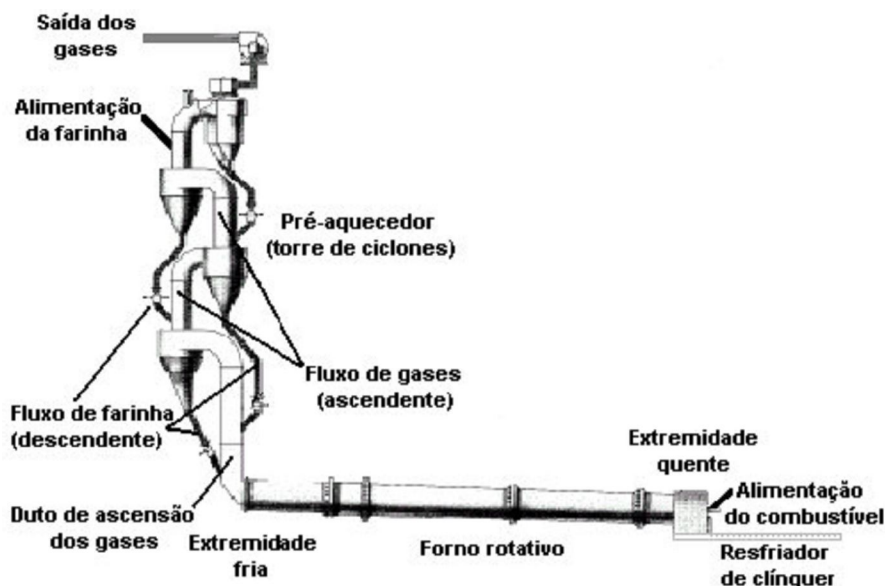


Figura 4 – Forno rotativo de via seca com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones, com indicação dos fluxos de farinha e gases.

Fonte: CEMBUREAU (1999)

A norma americana, por sua vez, classifica os processos de fabricação de clínquer de maneira diferente da européia, contemplando cinco categorias:

- Processo via úmida;
- Processo longo via seca;
- Processo via seca com pré-aquecedor, e
- Processo via seca com pré-aquecedor e pré-calcinador (USEPA, 1994).

Erhard e Scheuer (1993) relatam que uma parte considerável do clínquer produzido em escala mundial ainda utiliza o processamento de matérias-primas por via úmida. Avaliam que essa é uma consequência do histórico do desenvolvimento dos custos energéticos e do processo tecnológico de produção de cimento. O consumo específico de energia térmica em processos de via úmida é comparativamente mais alto que aquele resultante de processos de via seca já que parte dele é utilizado para a evaporação da água contida no material alimentado no forno. Os autores ressaltam que o teor de umidade das matérias-primas disponíveis

é um importante fator a ser considerado quando da seleção do sistema-forno que será empregado na manufatura do clínquer. Erhard e Scheuer (1993, *apud* MANTEGAZZA, 2004, p.113)

O calor sensível do gás de exaustão de um forno rotativo é suficiente para a secagem de somente 5% a 10% da umidade das matérias-primas dependendo do tipo de processo utilizado. Se o gás do resfriador de clínquer também estiver disponível, então o teor de umidade pode ser limitado em aproximadamente 15%. Com o decréscimo do consumo específico de calor do sistema-forno a capacidade de secagem dos gases de exaustão é diminuída. Erhard e Scheuer (1993, *apud* MANTEGAZZA, 2004, p.113).

Vale ressaltar que independentemente da denominação dada às variantes do processo produtivo do clínquer, em cada uma delas são realizadas as mesmas etapas físicas e químicas de transformação das matérias-primas utilizadas. As diferenças entre elas referem-se ao projeto do equipamento, método de operação e, principalmente ao consumo de energia térmica, o qual, geralmente decresce na ordem dos processos citados (Tabela 5) em razão da redução do teor de umidade da mistura alimentada no sistema-forno.

Os processos de produção de via seca são os preferidos devido ao menor consumo de energia, exceto nas situações em que o teor de umidade das matérias-primas indique a viabilidade do uso de outros sistemas fornos.

Tabela 5 - Consumo específico médio de calor em processo de clínquer industrial para cimento.

Tipo de forno	Consumo específico médio de calor	
	Kj/Kg clínquer	Kcal/Kg clínquer
Via úmida	4600 a 600	1099 a 1433
Longo via seca sem pré-aquecedor	4500	1075
Semi-seco com grade pré-aquecedora	3500 a 3700	836 884
Curto via seca com pré-aquecedor de	300 a 3600	778 a 860
Curto pré-calcinador com pré-aquecedor	3000	717

Fontes: Erhard e Scheuer (1993, *apud* MANTEGAZZA, 2004,)

2.5.6. Etapas do processo produtivo

O menor consumo de calor e o maior rendimento na produção de clínquer é alcançado por sistemas fornos que são alimentados com farinha crua seca através de pré-aquecedor de ciclones de múltiplos estágios. Esses sistemas são mecanicamente mais simples que os fornos longos de via úmida e longos de via seca e, provavelmente, são hoje os tipos mais utilizados pela indústria cimenteira em âmbito mundial (CEMBUREAU, 1999).

No Brasil, entre os anos de 1996 e 1997, de 97% a 98% da produção de cimento era proveniente de fornos de via seca dotados de pré-aquecedores e pré-calcinadores com consumo térmico específico variando entre 700 kcal/kg a 900 kcal/kg de clínquer e somente de 3% a 2% fabricados em fornos de via úmida com consumos térmicos muito mais elevados. (KIHARA, 1999).

Portanto, para descrição das etapas envolvidas na fabricação do clínquer será considerado o processo de via seca com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones, inserindo-se, quando oportuno, informações relativas ao sistema que também dispõe de pré-calcinador.

Ritzmann (1974) relata que a evolução desses sistemas-fornos iniciou-se nos anos 30 quando foi inventado o pré-aquecedor suspenso e que entre os anos de 1959 a 1974 registrou-se uma tendência de utilização de farinha crua pré-aquecida. No início dos anos 50, no entanto, praticamente não ocorreu a comercialização de fornos pré-aquecedores. Posteriormente o número deles cresceu continuamente até alcançar um recorde de aproximadamente 90% da capacidade total vendida em 1971. Ritzmann (1974, *apud* MANTEGAZZA, 2004, p.115)

A partir do início dos anos 70 o sistema-forno pré-aquecedor de ciclones com 4 estágios foi adotado como tecnologia padrão. Simultaneamente cresceram também as dimensões dos fornos, assim como a capacidade média de produção de clínquer. Em 1960 atingiam 500 toneladas diárias e em 1971 alcançavam capacidades produtivas superiores a 2.000 t/dia.

A utilização dos pré-aquecedores trouxe dificuldades relativas à formação das colagens nas partes internas do equipamento, primariamente associadas aos teores de cloro, álcalis e enxofre, sendo proposta a instalação de um duto de by-pass para contornar o problema. Esse dispositivo permitiria a remoção de parte dos gases provenientes do forno, antes de sua entrada no pré-aquecedor, apresentado

como desvantagens o aumento do consumo térmico e a necessidade de instalação de um sistema complementar de despoejamento. Posteriormente esse tipo de equipamento evoluiu para os pré-aquecedores de 5 ou 6 estágios com a instalação de pré- calcinador, os quais são considerados atualmente como tecnologias de escolha para novas plantas, podendo, teoricamente, atingir a produção de até 15.000 ton diárias de clínquer (CEMBUREAU, 1999).

As etapas da manufatura do clínquer e cimento podem ser agrupados conforme discriminação a seguir:

- Extração de calcário e argila seguida de britagem;
- Pré-homogeneização, dosagem e moagem das matérias-primas;
- Homogeneização da mistura crua – farinha;
- Calcinação e clinquerização seguida de resfriamento;
- Moagem do clínquer para produção do cimento;
- Armazenamento e expedição.

Na Figura 5 é apresentado o fluxograma simplificado do processo de produção de clínquer e cimento contemplando as etapas mencionadas

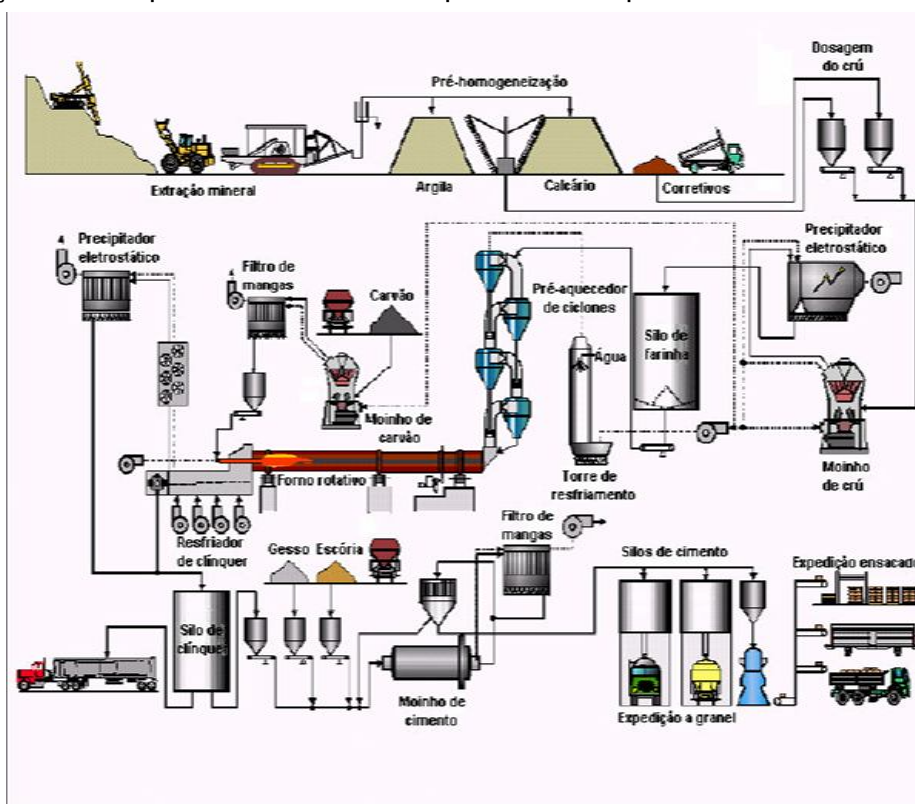


Figura 5 – Fluxograma simplificado do processo de produção de clínquer e cimento utilizando sistema-forno de via seca com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones.
Fonte: CEMBUREAU (1999), adaptada pelo autor.

2.5.7. Extração de calcário e argila seguida de britagem

As principais matérias-primas utilizadas na produção do clínquer são o calcário e a argila. A especificação média para os calcários destinados à fabricação de cimento prevê que eles devem ter mais de 75% de CaCO_3 , menos de 3% de MgO e menos de 0,5% de P_2O_5 .

Durante o processo de produção de clínquer o carbonato de cálcio (CaCO_3) é decomposto termicamente em cal livre (CaO) e dióxido de carbono (CO_2). Por causa de uma grande parcela (aproximadamente 1/3) da massa calcária ser perdida como dióxido de carbono no forno, as plantas de cimento Portland são localizadas, sempre que possível próximas das fontes dessa matéria-prima (USEPA, 1994).

O calcário é extraído de cavas superficiais podendo também ser extraído de minas subterrâneas. As matérias-primas podem variar de uma jazida para outra, requerendo, normalmente, o uso de aditivos como bauxita, minério de ferro ou areia (sílica) para a obtenção da combinação química ideal da mistura crua utilizada na produção do clínquer. As faixas de concentração de metais pesados e halogênios encontradas nas principais matérias-primas do cimento e na crosta terrestre são resumidas na Tabela 6.

Ocasionalmente bolsões de pirita (FeS_2) podem ser encontrados em depósitos de calcário e argila incrementando significativamente as emissões de dióxido de enxofre (SO_2) provenientes do processo produtivo.

O calcário e a argila são submetidos a uma britagem primária, normalmente em instalações existentes nas proximidades da própria jazida.

Posteriormente são transferidos para as instalações destinadas à britagem secundária, por meio de correias transportadoras, teleféricos, vagonetas, caminhões ou outros meios de transporte, para adequação à granuloterapia exigida para a etapa seguinte do processamento industrial.

Tabela 6: Concentrações (ppm) de metais pesados e halogêneos em matérias-primas para clínquer e cimento e na crosta terrestre

Constituinte	Calcário	Argila	Crosta Terrestre
METAIS PESADOS			
Antimônio	ND	ND	1
Arsênio	0,2 - 12	13 - 23	5
Bário	ND	ND	250
Berílio	0,5	3	6
Cádmio	0,035 - 0,1	0,016 - 0,3	0,15
Cromo	1,2 - 16	90 - 109	200
Chumbo	0,4 - 13	13 - 22	16
Mercurio	0,03	0,45	0,5
Níquel	1,5 - 7,5	67 - 71	80
Selênio	0,19	0,5	0,09
Prata	ND	0,07	0,1
Tálio	0,05 - 0,5	0,7 - 1,6	0,6
Vanádio	10 - 80	98 - 170	150
Zinco	22 - 24	59 - 115	132
HALOGÊNIOS			
Bromo	5,9	1 - 58	1,6
Cloro	50 - 240	15 - 450	314
Flúor	100- 940	300 - 990	300
Iodo	0,25- 0,75	0,2 - 2,2	0,3

ND – dados não disponíveis

Fonte: Sprung, (1985, apud, MANTEGAZZA, 2004)

2.5.8. Pré-homogeneização, dosagem e moagem das matérias-primas

O calcário é normalmente armazenado em pilhas, possibilitando que na operação de retomada ocorra uma pré-homogeneização das matérias primas provenientes das jazidas utilizadas para a preparação do cru, devidamente dosadas com argila e os demais aditivos referidos, necessários para a obtenção de um clínquer de boa qualidade. Conforme citado a mistura é alimentada em moinhos de bolas ou de rolos para cominuição, sendo simultaneamente secas pelos gases quentes provenientes do forno rotativo. O material finamente dividido denominado farinha é, normalmente, selecionado granulometricamente através de separadores dinâmicos por meio de sistema pneumático e encaminhado aos silos de armazenamento para posterior alimentação no sistema-forno.

2.5.9. Homogeneização da mistura crua – farinha

Qualitativamente a farinha é composta por carbonato de cálcio - CaCO_3 ; dióxido de silício - SiO_2 ; óxido de alumínio - Al_2O_3 ; óxido de ferro - Fe_2O_3 ; óxido de magnésio - MgO ; óxido de potássio - K_2O e óxido de sódio - Na_2O . Na Tabela 7 são apresentadas as composições médias das principais matérias-primas, corretivos e da farinha crua utilizados na produção de clínquer de cimento conforme CEMBUREAU (1999).

Dentro dos silos de armazenamento a farinha é submetida a um processo de mistura através de sistemas pneumáticos, cuja finalidade é promover a homogeneização do material. Essa operação tem por objetivo minimizar a ocorrência de variações localizadas de composição, originárias da fase de dosagem, e otimizar as reações de clínquerização que se desenvolverão no interior do forno rotativo.

Sprung (1988) cita que as propriedades químicas e físicas do clínquer Portland são caracteristicamente determinadas pelos elementos maiores e menores. Cálcio (Ca), silício (Si) e alumínio (Al) aparecem com concentração maior que 5% em peso e são classificados como elementos maiores ou principais. Sprung (1988, MANTEGAZZA, 2004, p.119) .Outros autores incluem o ferro como elemento maior e referem que os elementos menores aparecem em praticamente todos os clínqueres comerciais em concentrações entre 1% e 5% sob a forma de óxidos, como por exemplo: sódio (Na), potássio (K), magnésio (Mg), enxofre (S), manganês (Mn), fósforo (P) e titânio (Ti) (MARINGOLO, 2001).

Adicionalmente ocorre a entrada de materiais que contêm elementos traços os quais estão presentes em concentrações menores que 100 ppm a 200 ppm na substância sólida. A natureza e concentração desses elementos nas matérias-primas são determinadas pelas distribuições geoquímicas nos depósitos naturais e podem variar acima de uma margem relativamente grande (MARINGOLO, 2001).

Tabela 7: Composição química (% em massa) das principais matérias primas, corretivos e farinha crua utilizados em sistemas fornos para a produção de clínquer para cimento.

Compostos	Matérias primas principais			Corretivos			Farinha crua
	Calcário	Marga	Argila	Areia	Minério de ferro	Bauxita	
SiO ₂	0,5 a 3	3 a 50	37 a 78	80 a 99	4 a 11	2,9	12 a 16
Al ₂ O ₃ + TiO ₂	0,1 a 1	1 a 20	7 a 30	0,5 a 3	0,2 a 3	57,5	2 a 5
FeO ₃ + MnO ₃	0,1 a 0,5	0,5 a 10	2 a 15	0,5 a 2	19 a 95	22,8	5
CaO	52 a 55	5 a 52	0,5 a 25	0,1 a 3	0,1 a 34	2,4	40 a 45
MgO	0,5 a 5	0,5 a 5	5	0,5	1,5	0,04	0,3 a 3
K ₂ O	0,3	3,5	1	1	traços	0,04	0,2 a 1,4
Na ₂ O	0,1	0,2	0,1 a 0,3	0,5	traços	0,02	0,3
SO ₃	0,1	0,1 a 4	3	0,5	traços	0,12	1,2
Perda ao fogo(CO ₂	40 a 44	2 a 42	1 a 20	5	0,1 a 30	13,5	32 a 36

Fonte: CEMBUREAU (1999).

Uma farinha típica é dosada com 90% de calcário, 8% de xisto ou argila, 1,3% de bauxita e 0,7% de minério de ferro, para produzir um clínquer com 67% de CaO; 22% de SiO₂; 5% de Al₂O₃; 3% de Fe₂O₃ e 3% de elementos menores.

2.5.10. Calcinação e clinquerização seguida de resfriamento

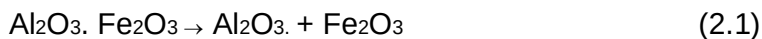
O coração do processo de fabricação do cimento Portland é o sistema-forno. Este sistema transforma a mistura crua em clínqueres constituídos principalmente por silicatos de cálcio, formados através da reação entre o calcário e a argila sob altas temperaturas. Os clínqueres podem ser descritos como nódulos esféricos cinza, vítreos, com diâmetro variando entre 0,32 cm a 5,1 cm.

Moir e Glasser (1992) relatam que os principais óxidos componentes do clínquer para cimento, CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ normalmente são responsáveis por 96% a 97% das análises químicas. Os níveis relativos desses quatro óxidos controlam as proporções dos quatro principais minerais do clínquer C₃S

(3CaO.SiO₂), C₂S (2CaO.SiO₂), C₃A (3CaO.Al₂O₃) e C₄AF (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃) e essas proporções têm uma influência fundamental sobre as propriedades do cimento. Os autores observam que os componentes menores, responsáveis por 3% a 4% dos constituintes do clínquer, também podem ter uma influência muito significativa sobre o processo de produção e nas propriedades do cimento. Moir e Glasser (1992, *apud* , MANTEGAZA, 2004, p.121)

As reações químicas e os processos físicos responsáveis por essas transformações são bastante complexas, mas podem ser, conceitualmente, divididas conforme a seqüência apresentada a seguir:

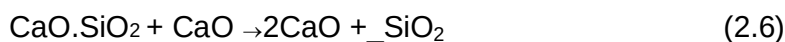
- Evaporação da água livre;
- Perda da água adsorvida;
- Remoção da água combinada nos componentes argilosos;
- Alteração e decomposição das estruturas dos minerais de argila e formação de uma mistura de óxidos reativos;



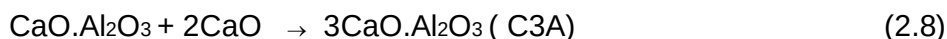
Calcinação dos carbonatos de cálcio e magnésio para óxidos de cálcio e de magnésio;



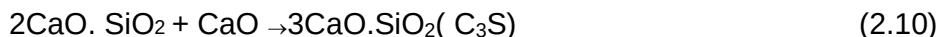
Reação do óxido de cálcio com sílica para produzir silicato dicálcico;



Reação do óxido de cálcio com o alumínio e os constituintes ferruginosos para formar a fase líquida;



Formação dos nódulos de clínquer; evaporação dos constituintes voláteis como sódio, potássio, cloretos e sulfatos; e reação do excesso de óxido de cálcio com o silicato dicálcico para a formação de silicato tricálcico.



Os principais minerais do clínquer podem ser então resumidos em:

- Silicato tricálcico $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ C_3S - alita;
- Silicato dicálcico $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ C_2S belita;
- Aluminato tricálcico $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ C_3A - aluminato; e
- Ferro aluminato tetracálcico $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)

Grande parte da energia térmica disponibilizada no sistema-forno é, portanto, destinada a propiciar a ocorrência da reação (2.10).

A USEPA (1994) resume essa seqüência de eventos em quatro estágios, em função do local de ocorrência e da temperatura dos materiais no sistema-forno:

- Evaporação da água não combinada das matérias primas no pré-aquecedor quando a temperatura aumenta até 100°C;
- Desidratação, quando a temperatura do material aumentar de 100°C até aproximadamente 430°C no pré-aquecedor, para formar óxidos de sílica, ferro e alumínio;
- Calcinação inicia no pré aquecedor e é completada no forno rotativo durante o qual o dióxido de carbono (CO_2) é liberado para formar óxido de cálcio (CaO) e;
- Reação dos óxidos na zona de queima do forno rotativo, para formar o clínquer a uma temperatura aproximadamente de 1450°C a 1510°C (USEPA, 1994).

Após deixar o interior do forno rotativo o clínquer é lançado no resfriador, última etapa de seu processo produtivo, no qual é utilizado ar atmosférico para a obtenção de um resfriamento adequado. Sob a ação do rápido resfriamento as fases cristalinas anidras tornar-se-ão metaestáveis nas condições ambientes reagindo

prontamente quando hidratadas, caracterizando a propriedade hidráulica do cimento (MARINGOLO, 2001).

2.5.11. Moagem do clínquer para produção de cimento

A etapa final de fabricação envolve uma sequência de operações de mistura e moagem que transforma o clínquer em cimento portland acabado. O cimento portland consiste de uma mistura adequada de clínquer e gesso que é alimentada em moinho de bolas ou vertical, às vezes combinado com moinhos de pressão, para moagem e obtenção do produto final cuja granulometria e demais propriedades têm que estar em conformidade com as Normas Técnicas estabelecidas pelos organismos controladores.

São também produzidos os chamados cimentos compostos, os quais utilizam adicionalmente escória de alto forno em proporção que pode chegar a 70% em peso, calcário até 5%, pozolanas de 15% a 25% e demais aditivos dosados de acordo com as especificações requeridas. O gesso ou anidrido natural é introduzido no processo numa proporção de até 5% para controle do tempo de pega do cimento e outros materiais são adicionados para conferir propriedades específicas ao produto.

A finalização do processo é realizada em sistema de circuito fechado com a classificação granulométrica do cimento também realizada através de separadores dinâmicos, acionados por sistemas pneumáticos, que separam as partículas mais finas daquelas mais grosseiras, as quais retornam ao processo para continuidade da moagem.

2.5.12. Armazenamento e Expedição

O cimento acabado é transferido para silos de armazenagem, dos quais normalmente é extraído para ensaque ou expedição a granel. Para transferência do cimento aos silos podem ser usados sistemas de transporte mecânico (esteiras) ou pneumático (calhas). O uso de uma combinação de aerodeslizadores ou transportadores de rosca com elevadores de canecas têm sido comuns atualmente.

Para a estocagem do cimento vários silos, normalmente, são necessários em razão das características diversas dos tipos produzidos. Entretanto, os novos

projetos de silos, conhecidos como silos multi-câmaras, permitem o armazenamento de mais de um tipo de cimento, utilizando-se a mesma estrutura, em razão de ser compartimentado. Comenta-se ainda a possibilidade de armazenamento das várias matérias-primas e aditivos previamente moídos nas faixas granulométricas de interesse, para posterior mistura nas proporções pré-estabelecidas obtendo-se os cimentos com as características desejadas.

Normalmente os equipamentos de despoeiramento, tanto dos sistemas de transporte, dos pontos de transferência e de descarregamento do produto, como dos pontos de abastecimento das ensacadeiras ou de caminhões graneleiros, são constituídos por baterias de filtros de mangas.

2.5.13. Sistema Forno

As principais características inerentes ao processo de produção de clínquer resumem-se aos elevados tempos de residência dos gases e matérias-primas, às altas temperaturas, alta turbulência, atmosfera alcalina e ambiente oxidante no interior do forno. As altas temperaturas decorrem da queima do combustível no maçarico principal e do calor radiante a partir do refratário da fornalha rotativa. Os tempos de residência devem-se tanto ao trajeto percorrido pelas matérias-primas, desde a alimentação no pré-aquecedor até a descarga do produto no resfriador de clínquer, como àquele percorrido pelos gases quentes através do forno e pré-aquecedor.

Fornos pré calcinadores utilizam um segundo queimador para facilitar a calcinação da farinha num recipiente separado, porém, ligado ao pré-aquecedor de ciclones. O calcinador utiliza ar de combustão pré-aquecido, proveniente do resfriador de clínquer ou gases de saída do forno, denominado ar terciário. Nesse sistema o calor é gerado através da queima de aproximadamente 60% do consumo total de combustível no queimador secundário e o restante no maçarico principal do forno para completar as reações de clinquerização.

O ambiente oxidante é devido ao excesso de ar necessário às adequadas condições de combustão e o ambiente alcalino é resultado da decomposição de elementos constituintes da farinha. Como já comentado a alta turbulência é proporcionada pelas condições fluidodinâmicas no interior do forno rotativo.

No interior do sistema-forno de manufatura de clínquer são caracterizados dois fluxos: um de material sólido e um gasoso.

Nas figuras 6 e 7 são mostrados, respectivamente, os cortes esquemáticos de sistemas fornos pré-aquecedor e pré calcinador, ilustrando os processos de troca de calor em contra-corrente dos gases de combustão, gerados nos maçaricos principal e secundário, com as matérias-primas cruas alimentadas nas torres de ciclones.

Na figura 8 são apresentados os perfis característicos das temperaturas dos fluxos de matérias-primas e dos gases de combustão gerados num sistema-forno de via seca com pré-aquecedor e pré calcinador.

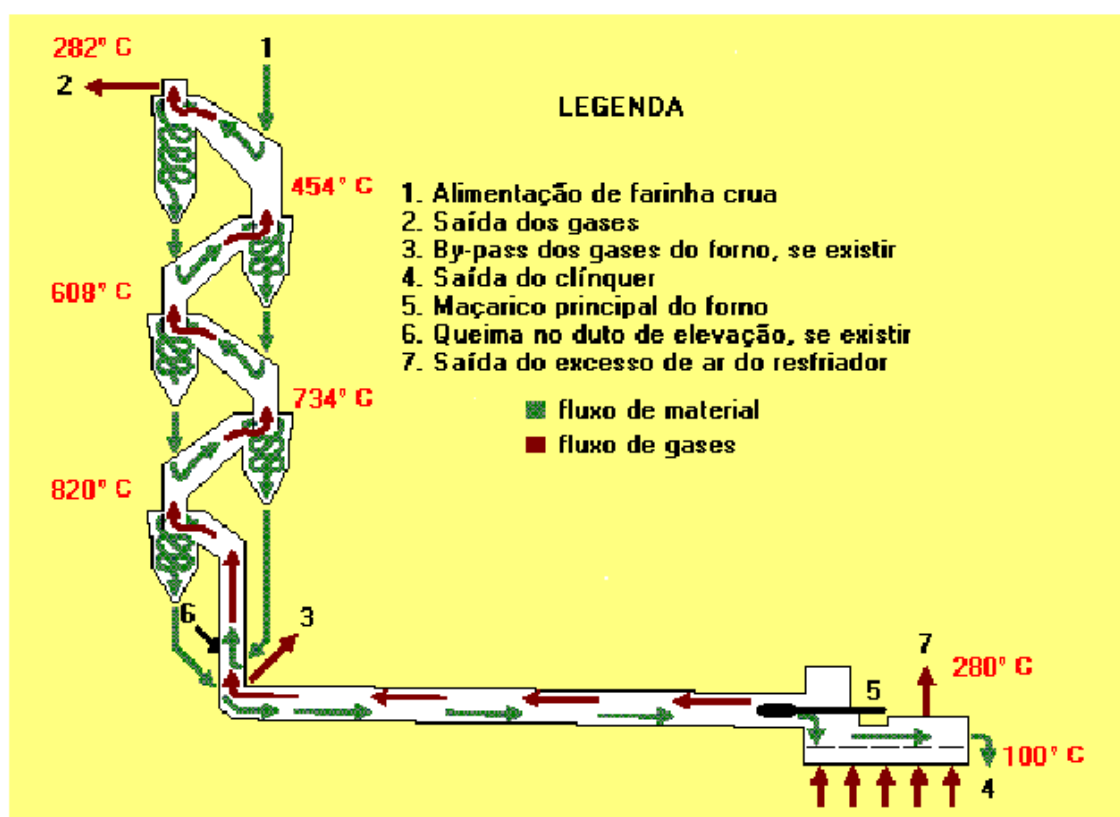


Figura 6 – Fluxos das matérias-primas cruas e dos gases gerados num forno de via seca com pré-aquecedor de ciclones.

Fonte: F.L Smidth (2004)

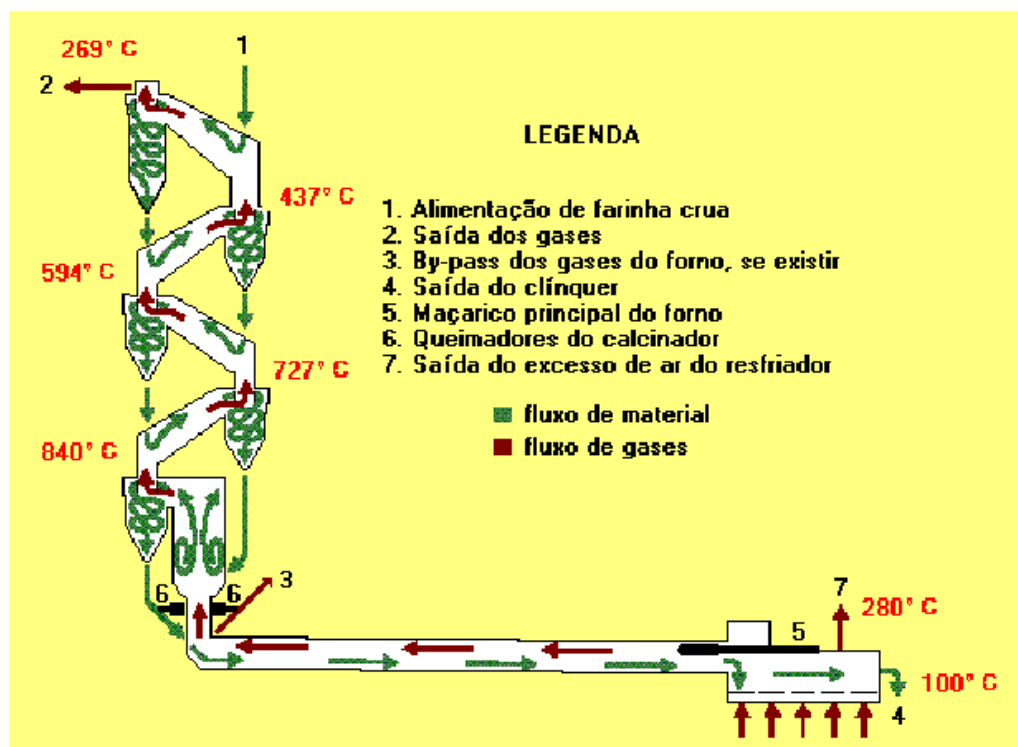


Figura 7 – Fluxos das matérias-primas cruas e dos gases gerados num forno de via seca com pré-aquecedor de ciclones e pré calcinador.
Fonte: F.L Smidth (2004).

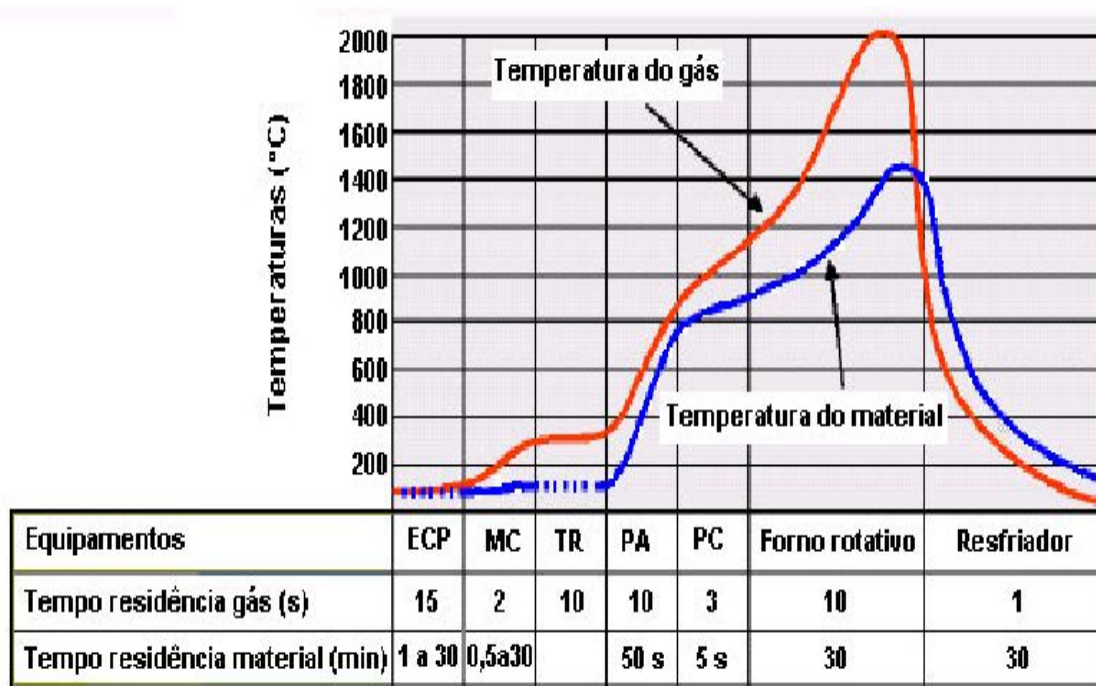


Figura 8 – Perfis de temperaturas dos gases e materiais sólidos num sistema – forno equipado com pré-aquecedor de ciclone e pré-calcinador.
Fonte : CEMBUREAU (1999)

Legenda : ECP – Equipamento de controle de poluição atmosférica

MC – Moinho de cru

TR – Torre de resfriamento dos gases ;

PA – pré – aquecedor – torre de ciclone

PC – pré – calcinador

2.5.14. Fluxo do material sólido

Conforme apresentado na Figura 4, verifica-se que acoplado na extremidade alta (fria) do forno rotativo encontra-se instalada a torre de ciclones para a secagem e pré-aquecimento da farinha.

Essa torre é constituída por um conjunto de 4 a 6 ciclones sobrepostos verticalmente, também revestidos com tijolos refratários. A farinha homogeneizada é alimentada na parte superior do pré-aquecedor, com temperatura entre 20°C a 40°C e controlada por dosador gravimétrico. À medida que a farinha desce pelos ciclones, por ação da gravidade, encontra os gases quentes de combustão em contracorrente. Através da troca térmica se aquece gradativamente até chegar à parte mais alta do forno com temperaturas na faixa de 810°C a 900°C, sendo lançada em seu interior parcialmente calcinada.

Nos fornos equipados com pré-calcinador, instalado nos estágios inferiores da torre de ciclones, pode-se calcinar quase que integralmente a farinha antes de sua introdução no forno, atingindo até 95% da calcinação dos carbonatos. O surgimento dessa tecnologia propiciou o desenvolvimento de projetos de fornos com menores comprimentos e consumos térmicos, além da possibilidade de utilização de combustíveis menos nobres no pré-calcinador.

Devido ao movimento giratório e à inclinação do cilindro a farinha é deslocada lentamente da entrada para a parte mais baixa do forno rotativo, através do escorregamento da carga. A carga é definida em função da inclinação, não devendo exceder 13% da seção transversal da fornalha para maximizar a transferência de calor para as matérias-primas (MARINGOLO, 2001).

À medida que avança no contra-fluxo aos gases quentes a farinha é aquecida até atingir as faixas adequadas de temperaturas nas quais se processam as reações de clinquerização. As reações químicas apresentadas e os processos físicos que caracterizam a transformação dos materiais alimentados, apesar de complexos, podem ser simplificadamente indicados quanto ao local de ocorrência no sistema-forno pelas etapas discriminadas a seguir e ilustradas na Figura 9.

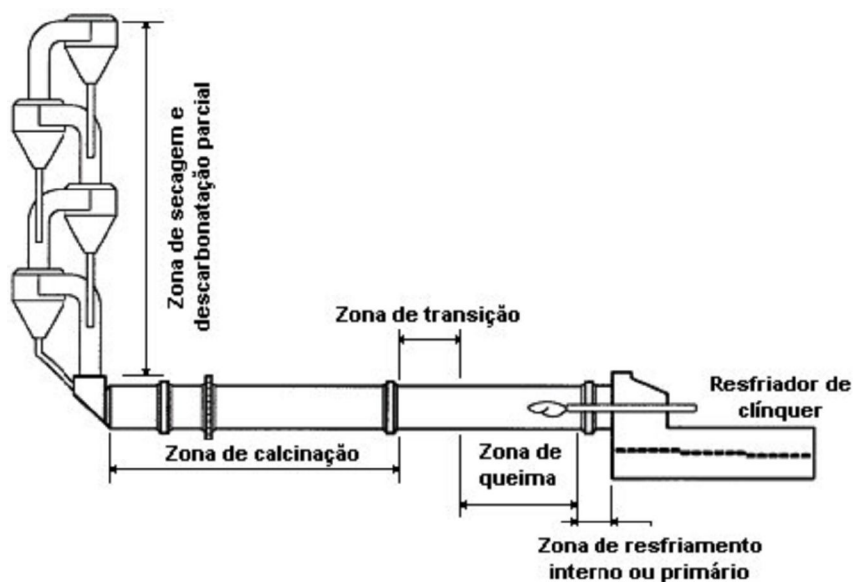


Figura 9 – Caracterização das zonas integrantes do processo de produção de clínquer em sistema-forno de via seca com pré-aquecedor, tipo torre de ciclones.
Fonte: CEMBUREAU (1999).

Zona de secagem e Descarbonatação Parcial

A primeira etapa do processo de manufatura do clínquer ocorre no pré-aquecedor e consiste na evaporação da umidade residual e no início da descarbonatação da farinha, aquecida pelos gases de combustão em contracorrente.

Zona de Calcinação

Na parte mais alta do forno, à entrada da farinha pré-aquecida, ocorre a segunda etapa da fabricação do clínquer com a completa dissociação dos carbonatos de cálcio e de magnésio, produzindo os óxidos de cálcio (sólido), de magnésio (sólido) e o dióxido de carbono (gás). As características dessa zona são também dependentes da existência de pré-calcinador.

Zona de Transição

Na parte intermediária do forno começam a ocorrer as primeiras reações de clínquerização com formação de fase líquida, quando são produzidos os compostos de cálcio com alumínio e ferro, que resultarão no ferro-aluminato tetracálcio (C_4AF) e aluminato-tricálcico (C_3A). Também se inicia a formação do silicato dicálcico (C_2S - belita).

Zona de Queima ou Clinquerização

À medida que o material continua se deslocando até a região mais quente do forno intensifica-se a formação e o crescimento de partículas de alita (C_3S) proveniente da reação do silicato dicálcico (C_2S) com os óxidos de cálcio (CaO) remanescentes e sua sinterização.

Todo o consumo térmico no sistema-forno é necessário para propiciar a ocorrência da reação $2CaO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow 3CaO \cdot SiO_2$ (C_3S), da qual resultará a produção de alita que é o componente que confere maior resistência ao cimento.

Zona de resfriamento interno ou primário

Após ultrapassar a zona de queima o clínquer experimenta a primeira etapa de resfriamento, ainda dentro do forno, sendo lançado no resfriador a uma temperatura de aproximadamente 1100°C a 1400°C, dependendo do tipo de equipamento utilizado nessa operação.

A taxa de resfriamento do clínquer juntamente com as características da atmosfera do forno influenciam o desenvolvimento da resistência e definição do comportamento do cimento. Publicações antigas já demonstravam, unanimemente, que o rápido resfriamento do clínquer geralmente levava a maiores valores da resistência inicial e final do cimento.

Estudos recentes têm mostrado que o resfriamento numa atmosfera contendo oxigênio geralmente leva a valores finais de resistência maiores que o resfriamento em atmosfera redutora.

O rápido rebaixamento da temperatura de sinterização é requerido afim de prevenir a redução do conteúdo de C_3S pela reabsorção, a qual poderia levar a um acréscimo do conteúdo de C_2S e C_3A . É também requerido para evitar a decomposição do C_3S para C_2S e CaO e para obter uma granulometria fina da cristalização do periclásio (MgO). Sprung,(1979, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p.132)

2.5.15. Fluxo dos gases

Os gases de combustão percorrem o forno e ascendem no pré-aquecedor em contra-corrente com a farinha. Eles arrastam material particulado que é recuperado, por meio de separação centrífuga, numa bateria de ciclones instalada na saída (dos gases) do pré-aquecedor para posterior realimentação no forno rotativo.

Os gases provenientes do pré-aquecedor podem ser total ou parcialmente, aproveitados para promover a secagem das matérias-primas alimentadas no moinho de cru. Mesmo que o moinho não esteja em operação os gases provenientes do sistema-forno podem ser integralmente direcionados para a torre de resfriamento ou arrefecimento, para condicionamento, mediante a aspersão de água sobre o fluxo gasoso. Através dessa operação controlam-se, principalmente, a temperatura e umidade dos gases para sua introdução nos equipamentos de controle de poluição

(ECP's), bem como abate-se parcialmente o material particulado arrastado. Os gases resfriados são então direcionados aos ECP's constituídos, normalmente, por precipitadores eletrostáticos ou baterias de filtros de mangas.

Os filtros de mangas utilizam um meio filtrante para separar o particulado contido no fluxo gasoso. Enquanto o gás passa através das mangas de tecidos de fibras naturais ou sintéticas, as partículas de poeira são retidas entre os vazios das tramas.

Os precipitadores eletrostáticos ou eletrofiltros baseiam-se na utilização de forças eletrostáticas para separar o material particulado do fluxo gasoso. Descargas de eletrodos sob altas voltagens emitem elétrons os quais carregam negativamente as partículas de poeira. Devido ao campo elétrico formado entre os eletrodos de descarga e os de coleta as partículas eletricamente carregadas são atraídas e removidas do fluxo gasoso. O condicionamento dos gases, através da torre de resfriamento, é imprescindível para se alcançar a máxima eficiência do ECP em função, dentre outras variáveis, da adequação da temperatura do fluxo gasoso e da resistividade das partículas.

Dependendo de características específicas dos gases, podem ser utilizados pré-coletores, geralmente constituídos por baterias de ciclones, antecedendo os equipamentos principais de alta eficiência, para remoção da fração mais grosseira de particulados.

Parte do gás quente pode também ser usado no processo de secagem/moagem de carvão ou coque de petróleo. O fluxo de gás utilizado no moinho de cru é posteriormente direcionado ao ECP juntamente com os gases provenientes da torre de resfriamento para a remoção do pó em suspensão e lançamento na atmosfera.

Maringolo (2001) comenta que a instalação de coletores de pó é importante não apenas do ponto de vista ambiental, mas, sobretudo do econômico, visto que o pó retido representa de 20% a 30% da produção e pode retornar ao sistema como matéria-prima. As fábricas nacionais normalmente não necessitam de instalação de by-pass em razão dos baixos teores de álcalis nos materiais utilizados, propiciando, em grande parte, a integral reutilização dos pós-retidos nos equipamentos de controle de poluição.

No entanto, dependendo das características qualitativas das matérias-primas pode ser necessária a instalação de um duto de by-pass na saída do forno rotativo para remoção de parte do fluxo gasoso do processo.

Essa parcela pode chegar a 15% em volume e minimiza a geração de colagens nos ciclones do pré-aquecedor devido às reações dos gases ácidos e os álcalis (óxidos de sódio e potássio) presentes da farinha. Nessas plantas são então geradas quantidades consideráveis de resíduos sólidos, cuja denominação em inglês, cement Kiln dust (CKD) é traduzida como pó de forno de cimento. Esses resíduos, normalmente, não podem ser reintroduzidos no sistema devido aos altos teores de álcalis e cal livre que prejudicam a resistência do cimento.

Rhesi e Garg (1986) estudaram em escala de laboratório a produção de cimento usando pó de forno gerado em plantas produtivas da Índia. Essa iniciativa buscava alternativas para o gerenciamento do resíduo gerado numa faixa de 8% a 12% da produção de clínquer em processos de via úmida e de 10% a 15% em processos de via seca. Os autores concluíram que o cimento Portland comum poderia ser produzido através da utilização desses pós contendo até 1,5% de álcalis numa temperatura de 1 250°C, a partir da moagem do clínquer resultante com 4% em peso de gesso. Ressaltaram que a produção de clínquer na temperatura de 1 250°C contra 1 400°C a 1 450°C normalmente empregada para uma mistura convencional poderia resultar em considerável economia no consumo de combustíveis. Rhesi e Garg (1986, apud, MANTEGAZZA, 2004, p.133)

Kessler (1995) pesquisou a geração de pó de forno de cimento em processos de produção de clínquer referindo que a média nacional dos Estados Unidos em 1990 era de 9 ton para cada 100 ton clínquer produzido. O índice médio de geração para as plantas de via úmida era de 11,5%, para os fornos longos de via seca 10,5% e para os fornos pré-aquecedores/précalcinaidores de 4% da produção de clínquer. Kessler (1995, apud, MANTEGAZZA, 2004, p.134)

O autor relatou que esse resíduo causa perda de rendimento da produção de clínquer, estimando que cada ponto percentual de pó residual aumenta o consumo específico de calor em aproximadamente 0,7% e diminui a produção de clínquer em aproximadamente 0,5%. Ele apresentou uma estratégia organizada para minimizar a geração de pó de forno contemplando o monitoramento e controle do processo, a otimização das matérias-primas e combustíveis, o aperfeiçoamento da combustão, a alteração das matérias primas e o reprocessamento do pó gerado.

2.5.16. Resfriamento secundário de clínquer

Segundo Buzzi e Sassone (1993), o primeiro resfriador projetado e construído entre os anos de 1890 a 1900 era um tubo rotativo separado do forno, que tornou possível resfriar o clínquer para a realização da moagem da mistura de clínquer, gesso e aditivos, última etapa do processo de fabricação do cimento. Estimam que naquela época a temperatura do clínquer resfriado era menor que 350°C. Os autores mencionam que o resfriador planetário foi inventado aproximadamente 30 anos mais tarde, seguido finalmente pelo resfriador de grelhas durante os anos 40 do século 20. Buzzi e Sassone (1993, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p.134)

Os processos modernos de fabricação de clínquer podem, teoricamente, utilizar resfriadores rotativos, planetários e de grelhas, os quais necessitam satisfazer algumas funções principais:

- Proporcionar uma ótima recuperação do calor sensível do clínquer (1200 a 1500 kJ/kg de clínquer);
- Aquecer o ar secundário e possivelmente o ar terciário, requeridos como ar de combustão, nas temperaturas mais altas possíveis para minimizar o consumo de combustível;
- Adequar a taxa de resfriamento do clínquer aos requisitos de qualidade;
- Resfriar o clínquer nas temperaturas mais altas possíveis, levando em consideração o transporte, estocagem e moagem de cimento .

Na tabela 8 são apresentados alguns dos principais parâmetros técnicos e tecnológicos para fins de comparação entre os três tipos de resfriadores de clínquer citados.

No resfriador consegue-se recuperar até 30% do calor gerado pela queima de combustíveis no sistema-forno tornando possível o manuseio do clínquer com os equipamentos convencionais de transporte (USEPA, 1994).

O resfriador rotativo (Figura 10) pode ser construído como uma continuação do forno ou, por razões de espaço, na direção oposta. Em 1993 estimava-se que somente 5% dos resfriadores de clínquer em uso por todo o mundo eram desse tipo .Buzzi e Sassone,(1993, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p.135)

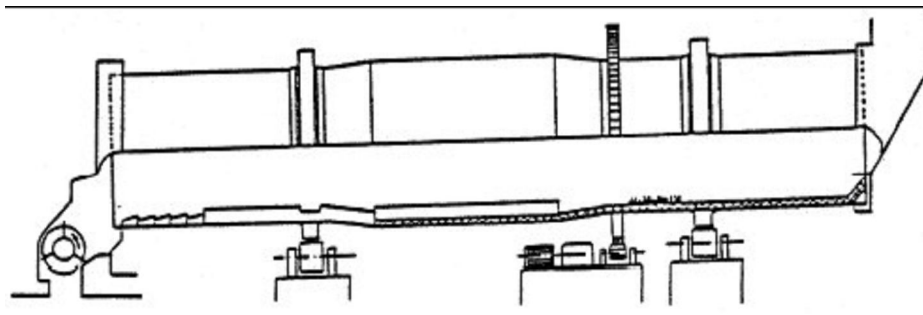


Figura 10 – Corte esquemático de um resfriador de clínquer rotativo.
Fonte: CEMBUREAU (1999).

Tabela 8 Parâmetros técnicos e tecnológicos dos resfriadores de clínquer

Discriminação	Unidades	Valores numéricos		
		Rotativo	Planetários	Grelhas
Rendimento	t/d	< 2000 a 4500	< 3000 a 4000	700 a 10000
Razão L/D (comprimento/diâmetro)		aprcx 10:1	9 a 12	
Faixa de velocidade	rpm	1 a 3		
Área de carregamento da grelha	t/m ² d			26 a 55
Inclinação	% ou °	3 a 5%		até 10
Volume específico de ar de resfriamento	Nm ³ /kg	0,8 a 1,1	0,8 a 1,0	1,6 a 2,6
Temperatura de entrada do clínquer	°C	1200 a 1400	1100 a 1250	1300 a 1400
Temperatura do clínquer resfriado	°C	200 a 400	200 a 300	70 a 120
Eficiência da área de resfriamento	%	56 a 70	60 a 68	60 a 75

Fonte: BUZZI e SASSONE (1993, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p.135)

Durante o período de 1980 a 1986 os resfriadores planetários (Figura 11) equipavam aproximadamente 10% das novas instalações produtoras de cimento. O resfriador planetário consiste de 9 ou 11 tubos de resfriamento individuais instalados rígida e simetricamente ao redor do forno, em sua extremidade quente.

Após completar a etapa de sinterização o clínquer quente é lançado nos cilindros resfriadores através de aberturas existentes no casco do forno. A quantidade de ar de resfriamento é determinada pela necessidade de ar de combustão e entra através de cada cilindro a partir da extremidade de descarga do produto.

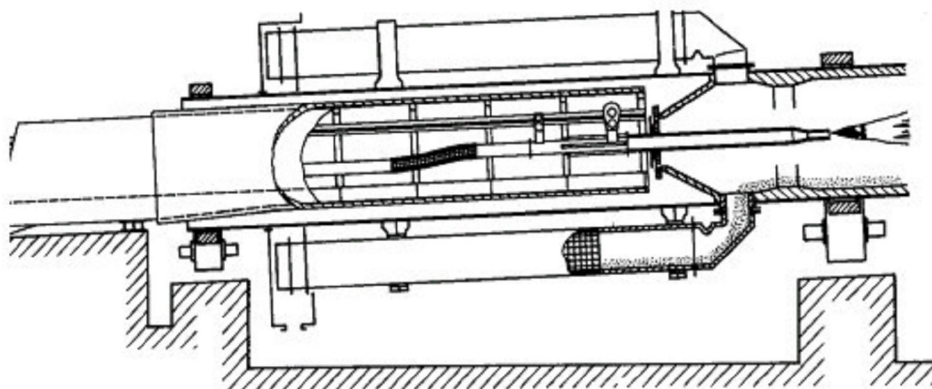


Figura 11 – Corte esquemático de um resfriador de clínquer de satélites ou planetário.
Fonte: CEMBUREAU (1999).

Semelhante ao resfriador rotativo, a transferência de calor ocorre através do fluxo de ar em contra-corrente ao clínquer, assim como, predominantemente na região interna dos tubos resfriadores, pelo fluxo transversal. Apresenta a desvantagem de não dispor, até o momento, de nenhuma forma comprovada de extração de ar terciário necessário para a operação de pré-calcinador, restringindo a possibilidade de otimização do processo.

Avaliações efetuadas em plantas industriais indicam que a eficiência dos resfriadores rotativos e planetários é fortemente dependente do tamanho das partículas do clínquer, fato não observado em resfriadores de grelhas, cujo rendimento independe, em grande medida, desse parâmetro.

O resfriador de grelhas é o tipo mais amplamente usado, estimando-se que entre 1980 a 1986 foi responsável por aproximadamente 85% do mercado. Entre os anos de 1978 a 1983 o desenvolvimento do resfriador de grelhas foi determinado predominantemente pela tendência de aumento das capacidades produtivas das plantas de cimento e atualmente as maiores unidades podem resfriar até 10 000 toneladas diárias de clínquer.

Duas formas de transporte do clínquer são aplicadas nesses resfriadores: grelhas móveis de circulação contínua (Figura 12) e grelhas convencionais (Figura 13) com movimentos alternados para frente e para trás (reciprocating action). Podem ser construídos inclinados, horizontais, combinados ou com grelhas escalonadas.

Devido à complexidade do mecanismo e à deficiente recuperação de calor o projeto de circulação contínua foi abandonado por volta do ano de 1980, no entanto, os resfriadores de grelhas ainda em uso incluem ambos os tipos.

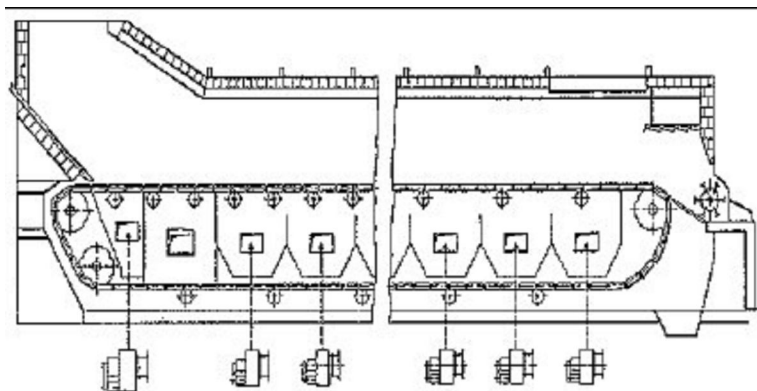


Figura 12 – Corte esquemático de um resfriador de clínquer de grelhas móveis.
Fonte: CEMBUREAU (1999).

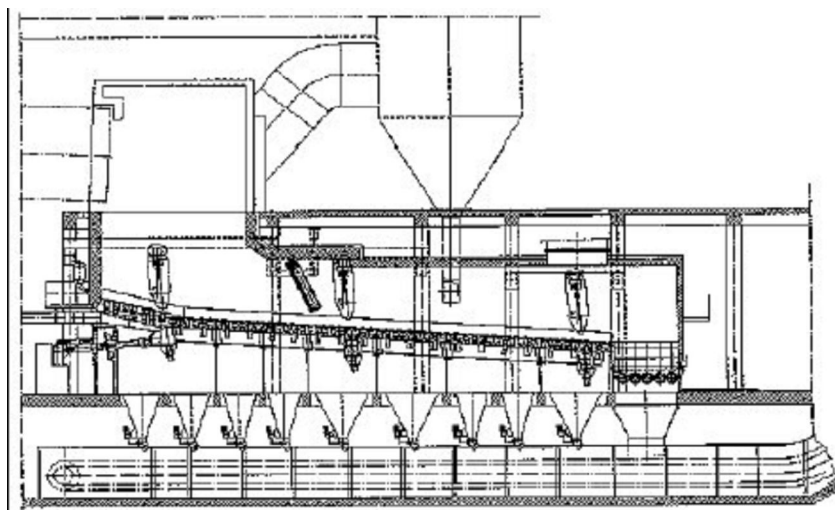


Figura 13 – Corte esquemático de um resfriador de clínquer de grelhas (convencional).
Fonte: CEMBUREAU (1999).

Resfriadores de grelhas são normalmente operados através do fornecimento de ar frio proveniente de potentes ventiladores instalados por debaixo das grelhas, os quais são necessários para manter o perfil de pressão.

Duas zonas distintas de resfriamento podem ser identificadas nesse tipo de equipamento:

- A zona de recuperação a partir da qual o ar quente é usado como ar de combustão para queima do combustível no maçarico principal (ar secundário) e no pré-calcinador (ar terciário); e
- Zona de pós - resfriamento, onde ar de resfriamento adicional garante as menores temperaturas de saída do clínquer (CEMBUREAU, 1999).

Por volta de 1983 foi iniciado o desenvolvimento de modernas tecnologias para resfriadores de grelhas, eliminando os problemas anteriores do sistema convencional otimizando-se a troca de calor. Também se tornaram mais compactos requerendo menores quantidades de ar de resfriamento e menores equipamentos de despoeiramento (CEMBUREAU, 1999).

2.5.17. Principais parâmetros de controle de processo produtivo

Kihara (1999) menciona que o forno rotativo de produção de clínquer é um reator químico de alta eficiência que opera em condições de alta temperatura e tempo de residência, ambiente oxidante e em regime de alta turbulência. Os parâmetros relacionados a seguir são citados por Marques (2000 apud MANTEGAZZA, 2004, p.140) para fins de controle do processo de produção de clínquer, os quais podem ser vistos como indicadores de desempenho da combustão:

- **Emissão de monóxido de carbono:** tem a concentração monitorada na saída da torre de ciclones, pois é indicativa das condições da combustão no interior do forno;
- **Emissão de óxido de nitrogênio:** tem a concentração monitorada devido à estreita dependência, na sua formação, da temperatura da chama e do ambiente oxidante na região da chama e pela sensibilidade às alterações das condições da combustão;
- **CaO livre no clínquer:** é um indicativo do grau em que se complementam as reações das matérias-primas no interior do forno, sendo determinado através de análise específica
- **Depressão na torre de ciclone:** a alteração da perda de carga entre os estágios do pré-aquecedor pode indicar a ocorrência de situações anormais nos processos de troca térmica, transporte de massa e de gases. A presença de materiais de baixa volatilidade no processo pode resultar em circulações internas de voláteis levando a incrustações provocadas pela condensação desses compostos em zonas mais frias do sistema-forno;
- **Torque do forno:** a maior formação de fase líquida gera maior pressão sobre o rolo de assentamento do forno exigindo maior torque para que possa realizar uma revolução completa;

- **Peso-litro do clínquer:** um clínquer denso indica que a “queima” do clínquer foi energética. Um valor muito baixo, ao contrário, indica que a “queima” foi insuficiente necessitando adequação das variáveis de controle do processo.

2.5.18. Emissão de poluentes no processo de produção de clínquer

O gás gerado no sistema-forno não contém somente CO₂, O₂, CO, N₂ e vapor d'água, mas também particulados da alimentação do pré-aquecedor e inúmeros outros compostos gasosos e vapores. Ele pode conter também compostos alcalinos, enxofre, cloretos e fluoretos os quais são formados a partir dos constituintes das matérias-primas e combustíveis alimentados no forno, vaporizados e dissociados pelas reações na fase gás.

No capítulo IV – Estudo de Caso são apresentados os principais poluentes MP, NO_x, SO₂, CO e THC gerados durante o processamento das matérias-primas usadas na fabricação do clínquer para cimento. De uma maneira resumida nesse parágrafo são apresentados outros poluentes gerados também durante a fabricação de clínquer

2.5.19. Emissão de CO₂

Segundo a United Nations Environment Programme (UNEP) (2001), a concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera terrestre antes da Era Industrial, por volta do ano 1750, era de 280+/-10 partes por milhão (ppm) por milhares de anos. Desde então ela aumentou, de início, lenta e depois progressiva e mais rapidamente atingindo 367 ppm em 1999, resultando numa taxa de crescimento sem precedentes durante o século passado. As concentrações de CO₂ foram medidas com alta precisão desde o ano de 1957 e essas medições concordavam com as avaliações feitas em amostras de gelo.

A entidade de pesquisa relata também que aproximadamente três quartos (3/4) dessas emissões são devidos à queima de combustíveis fósseis, representando 6,3+- 0,4 petagrama¹² (Pg) de carbono por ano durante o período de 1990 a 1999, equivalente à média diária de aproximadamente 17,3 milhões de toneladas.

Essa situação reflete também a condição nacional em matéria de consumo energético, conforme pode ser observado na Figura 14, que mostra a evolução das disponibilidades relativas de energia no período de 1940 a 2000. Verifica-se, com relação a lenha, a acentuada e crescente redução da disponibilidade com a conseqüente redução do consumo dessa energia renovável. Observa-se também o gradativo crescimento até a década de 80, das disponibilidades energéticas de derivados de petróleo, acompanhando a tendência mundial. Registre-se que a lenha consumida não foi replantada, providência essa desejável para que o CO₂ liberado como produto de combustão fosse removido da atmosfera.

A produção de cimento é uma fonte de emissão dos gases do efeito estufa (CO₂). Aproximadamente 5% das emissões antropogênicas de CO₂ provem da indústria de cimento (CEMBUREAU, 1999).

Grande parte (cerca de 50%) de emissões de dióxido de carbono da produção de cimento são originadas da reação química de conversão do calcário (CaCO₃) para óxido de cálcio (CaO), o primeiro precursor do cimento. Cerca de 40% da indústria emite CO₂ resultante da combustão de combustíveis fósseis durante as operações de produção do cimento. O remanescente é resultante das emissões do transporte de matérias-primas (cerca de 5%) e da combustão de combustíveis fósseis (cerca de 5%) requeridos para a produção da eletricidade consumida pelas operações de produção do cimento. (CEMBUREAU, 1999).

Em razão da imperiosa necessidade de redução dos custos de produção a indústria cimenteira minimizou progressivamente o consumo de energia resultando em níveis de emissão de CO₂, em média 30% menores nos últimos 25 anos (CEMBUREAU, 1999).

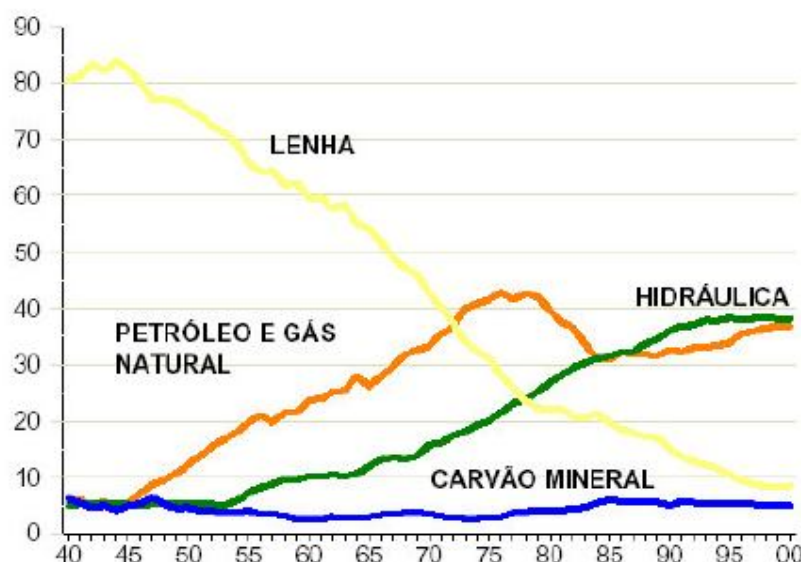


Figura 14 – Oferta interna de energia (%), no Brasil, no período de 1940 a 2000.
Fonte: BRASIL (2001).

A fim de parar a tendência de crescimento do nível de dióxido de carbono na atmosfera, ou pelo menos diminuí-la, as tentativas continuam sendo feitas não somente em relação aos combustíveis, mas também, segundo Menon (1993a), em relação à substituição das matérias-primas utilizadas na fabricação do cimento. Estima-se que mais de 60% do CO₂ emitido pelas instalações de produção de clínquer origina-se da descarbonatação do calcário, então a redução dessa fonte fica restrita à substituição parcial dos materiais crus carbonatos por materiais residuais com características qualitativas semelhantes e adequadas à preparação da farinha.

Segundo ABCP -2007, as indústrias de cimento tem se esforçado através de investimento em projetos ambientais de forma a redução da emissão de CO₂, em destaque para o aumento na substituição de clínquer por escoria de alto forno. Os benefícios são:

- Redução na demanda de energia na produção de cimento e na mineração de calcário;
- Redução de consumo de combustível fóssil o que resulta também na redução da poluição do ar no local;
- O uso reduzido de clínquer ajuda na conservação de recursos naturais não renováveis tais como o calcário e argila;

- Por usar menos calcário, as atividades relacionadas com sua extração são reduzidas. Isto resulta em importantes benefícios ambientais locais, como a mitigação local da poluição do ar, redução da perda de biodiversidade, e conservação do solo e da paisagem nas minas;
- Escória de alto-forno é um importante resíduo industrial que requer disposição final adequada. O uso deste resíduo como matéria prima ajuda a mitigar este problema, reduzindo os riscos de contaminação do solo e das águas devido a colocação em aterros inadequados.

É importante destacar que a indústria do cimento desempenha um papel significativo na Mudança Climática. Primeiro, porque a produção de cimento é um processo com alto consumo de energia, que exige grandes quantidades de combustível e eletricidade durante toda a cadeia de produção. Além disso, o processo químico que produz o clínquer (a calcinação de calcário) produz CO_2 não renovável. Estes dois fatores resultam na responsabilidade da indústria do cimento pela produção de 5% das emissões de CO_2 geradas pelo homem.

2.5.20. Emissão de ácido clorídrico e gás cloro

Barros, Tenório e Espinosa (2002) simularam as condições de produção de clínquer de cimento Portland num reator em escala de laboratório, buscando uma nova abordagem para o entendimento da fixação de metais no processo de clinquerização. O trabalho estudou a incorporação de óxidos de cromo e de níquel em clínquer sintético, bem como a influência de adições de cloretos sobre a retenção desses compostos.

O cloro é normalmente introduzido nos fornos de clínquer através das matérias-primas. Em argilas encontra-se, normalmente, entre 15 ppm a 450 ppm e no calcário entre 50 ppm a 240 ppm, usualmente na forma de cloreto de sódio. Os combustíveis podem conter até 1.100 ppm de cloro. A presença de álcalis (Na_2O e K_2O) é comum nas matérias-primas utilizadas na produção do clínquer. Esses óxidos são incorporados numa proporção de aproximadamente 50%. Esses compostos são voláteis e sob as temperaturas de clinquerização volatilizam e se condensam nas regiões frias do sistema forno (abaixo de 700°C) formando anéis que podem comprometer a operação produtiva. O cloro nos combustíveis e matérias-primas ocorre na forma iônica ou forma composta.

Durante a combustão o cloro forma gás cloro (Cl_2) e cloreto de hidrogênio (HCl) e sob a temperatura e turbulência dentro do forno, esses gases convertem todo o Na_2O e K_2O para NaCl e KCl . Cloretos de sódio e potássio são mais voláteis que seus óxidos; adições de cloreto de cálcio podem ser usadas para eliminar álcalis no processo de produção de cimento. Então se pode concluir que dentro do forno, cloro toma a forma de NaCl ou KCl .

Os cloretos de sódio e potássio também condensam nas regiões frias do sistema-forno de clínquer, além do fato de que eles têm um longo tempo de residência dentro do forno. No forno de clínquer o conteúdo máximo admitido de cloreto na carga é de 0,02% (200 ppm).

Em linhas produtivas equipadas com pré-aquecedores e pré-calcinadores os cloretos deixam o sistema antes de entrar, propriamente, no forno, minimizando o risco da formação de material condensado e um maior conteúdo de cloreto é admitido na carga. Todavia, o conteúdo máximo de cloretos torna-se uma função da eficiência do sistema de controle de particulado.

Mantus (1992) refere que quando compostos clorados são incinerados o cloreto de hidrogênio (HCl) ou cloro (Cl_2) é formado dependendo das condições do processo de combustão. Araújo (2002) cita que todos os halogêneos quando alimentados no forno de clínquer produzem substâncias ácidas que são facilmente neutralizadas pelo óxido de cálcio e incorporadas ao produto.

Sprung (1979) refere que ao contrário dos menos voláteis sulfatos alcalinos, os cloretos alcalinos evaporam mais facilmente. Os cloretos alcalinos alimentarão, então, freqüentemente, a circulação interna no forno e podem ser removidos através de um by-pass, se necessário. O autor refere que a concentração de cloreto na entrada do forno pode aumentar favorecendo a formação de colagens e anéis no próprio forno e na região do estágio mais baixo do pré-aquecedor. Contrariamente às reações do enxofre, os cloretos e vapor d'água na atmosfera do forno levam a um aumento na volatilidade dos álcalis. É então possível volatilizar os álcalis (Na e K) pela adição de cloro favorecendo a remoção dos cloretos alcalinos via by-pass e reduzindo suas concentrações no clínquer. Sprung (1979, *apud* , MANTEGAZZA, 2004, p.158)

Moir e Glasser (1992) referem que além do cloro, também o bromo e o iodo têm alta volatilidade no processo de manufatura de clínquer, volatilizando na zona de queima, normalmente como haletos alcalinos e condensando nas partes

frias do sistema formando depósitos que prejudicam o desempenho produtivo. Referem que como guia geral para uma eficiente operação de fornos pré-aquecedores e pré-calcinadores a entrada de cloretos, expressa como um percentual sobre o clínquer deve ficar abaixo de 0,03% e 0,04%, respectivamente. Comentam que os níveis de Br e I encontrados nas matérias-primas e combustíveis são muito menores que aqueles do cloro.

2.5.21. Emissões de metais pesados

Dellinger, Pershing e Sarofim (1993) comentam que o princípio da conservação requer que a massa de todos os metais introduzidos num forno de clínquer seja igual à massa saindo do sistema. Os metais podem entrar no sistema-forno junto com os combustíveis, matérias-primas ou resíduos combustíveis e devem sair incorporados no clínquer, adsorvidos no pó de forno ou como emissões atmosféricas pelo equipamento de controle de poluição. Tais emissões podem ser sólidas ou gasosas dependendo da volatilidade do metal pesado. Dellinger, Pershing e Sarofim (1993, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p.161)

Sprung e Rechenberg, (1984) referem que o regulamento alemão TA-Luft inclui arsênio (As), berílio (Be), chumbo (Pb), cádmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni), mercúrio (Hg), selênio (Se), telúrio (Te), tálio (Tl), vanádio (V) e zinco (Zn) dentre os elementos traços de relevância ambiental. Sprung e Rechenberg, (1984, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p.161)

Nas matérias-primas naturais da farinha os metais pesados ocorrem em quantidades traços (<100 ppm). Esses elementos também estão contidos nos resíduos utilizados como combustíveis suplementares ou alternativos e então quantidades maiores podem ser alimentadas no forno rotativo. Os metais pesados introduzidos nesse sistema são quase completamente incorporados no clínquer ou nos pós do forno e, normalmente, não afetam de forma mensurável as propriedades do cimento quando a concentração deles não excede 300 ppm a 400 ppm. É necessário, portanto, investigar o comportamento de elementos traços em fornos de clínquer não somente introduzidos com as matérias-primas e combustíveis convencionais, mas também aqueles contidos nos produtos residuais utilizados (SPRUNG, 1979, 1985, 1993, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p.161)

Conforme referido em CEMBUREAU (1999), nem todos os metais pesados são tóxicos e nem todos os metais tóxicos têm a mesma toxicidade. É citado o exemplo do TA-Luft que diferencia os metais pesados através da divisão em classes de toxicidade apresentadas na Tabela 9. Nas classes I e III estão indicados os metais pesados avaliados como os mais e os menos tóxicos, respectivamente.

Moir e Glasser (1992) consideram importante distinguir os componentes essencialmente não voláteis (ou refratários) encontrados no processo de fabricação de clínquer (MgO , TiO_2 , P_2O_5 , Mn_2O_3 , BaO , SrO , NiO , Co_2O_3 , CuO , Cr_2O_3 , entre outros) daqueles de baixa volatilidade (V_2O_5 , As_2O_3 e F) e daqueles altamente voláteis (SO_3 , K_2O , Na_2O , ZnO , Cl , PbO , CdO e Tl_2O). Moir e Glasser (1992, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p.162)

Os autores ressaltam a importância da volatilidade para:

- A operação do processo, particularmente a tendência para formar depósitos nas partes frias do forno;
- Ao potencial do maior nível de clínquer pela operação de by-pass dos gases do forno;
- O potencial de emissões prejudiciais ao meio ambiente e;
- A ocorrência de ciclo voláteis levando a maiores níveis de concentração desses componentes no forno que nas matérias primas

Tabela 9: Classificação de metais pesados instituída pelo TA-Luft, segundo o grau de toxicidade

Classe de toxicidade	Metais pesados
I	Cd, Hg e Ti
II	As, Co, Ni, Se, Te
III	Pb, Cr, Cu, Pt, V, Sn, Pd, Sb, Mn, Rh

Fonte: CEMBUREAU (1999)

Os metais pesados podem então ser agrupados nas três classes de comportamento observado nos sistemas fornos de produção de clínquer, porém, com algumas diferenciações conforme o autor consultado, exemplificadas através da Tabela 10.

O conceito de volatilidade caracteriza o comportamento dos elementos maiores, menores e traços na entrada de materiais fornecidos ao processo de fabricação de clínquer. Nas altas temperaturas requeridas pelo processo a ligação desses elementos nos materiais utilizados é parcial ou completamente destruída.

Tabela 10: Classificação de metais pesados, segundo a volatilidade, conforme o autor indicado

Classe	CEMBUREAU (1999)	USEPA(1994)	DELLINGER et al. (1993)	Comum todos
Refratários ou não voláteis	Be, Co, Mo, Sb, Se, Te, Zn	Ag, Ba, Ni	Ag, Al, Ba, Be, Ca, Fe, Ni, Ti	As, Cr, Cu, Mn, V
Semi-voláteis	Ti	K, Na, Sb, Se, Zn	K, Na, Sb, Se, Zn	Cd, Pb
voláteis	–	Ti	Ti	Ti

Fonte: elaborada pelo autor com base nas fontes indicadas

Grande parte dos elementos não voláteis entra na formação das fases do clínquer por meio das reações sólidas ou via fase líquida. Uma pequena proporção dos elementos vaporiza e passa para a fase gás. Na fase gasosa novos compostos são formados os quais se condensam nas partes frias do forno ou do pré-aquecedor ou em outros pontos do sistema e são precipitados no material alimentado ou nos pós circulantes.

Como resultado, ciclos internos e externos se desenvolvem no sistema-forno fechado (Figura 15). Quando as substâncias precipitadas são carregadas novamente para o interior das partes mais quentes do forno, onde elas novamente volatilizam, caracteriza-se o ciclo interno.

Ciclo interno é, portanto, o padrão de comportamento cíclico de determinado elemento ou composto que se concentra no forno ou principalmente no pré-aquecedor como consequência dos processos de volatilização e condensação.

O ciclo externo define o fluxo de massa de um elemento ou composto que é conduzido para fora do pré-aquecedor com o gás exaurido, o qual, através do processo de secagem e moagem das matérias-primas ou da reciclagem do pó

coletado no ECP é retornado para o silo de farinha e novamente alimentado no sistema-forno.

Para elucidação do comportamento de elementos traços durante o processo de produção de clínquer recorre-se, normalmente, às medições de balanços de massas.

Estabelecendo limites adequados para essas medições consegue-se determinar a magnitude dos fluxos de entrada e saída do sistema, bem como a percepção da volatilidade dos elementos circulantes sob as condições prevalentes no sistema-forno.

O balanço material de um sistema-forno pode ser dividido entre um balanço interno e um balanço externo. O balanço externo refere-se ao sistema de produção de clínquer como um todo, e permite aferir o equilíbrio de determinado elemento entre os teores de entrada e de saída do sistema-forno.

Os itens de entrada devem contemplar a alimentação do forno incluindo combustíveis, farinha e pós-reciclados. Os itens de saída devem considerar o clínquer, os pós-coletados e os gases e pós-emitidos pelas chaminés. Um déficit sistemático na saída do balanço externo indica que o elemento analisado é volátil e acumula-se nos ciclos ou na formação de colagens.

O balanço interno refere-se ao forno, resfriador e pré-aquecedor. Os itens de entrada consideram os combustíveis e a farinha, e os itens de saída consideram o clínquer, os pós-coletados, os gases e pós-emitidos, e os pós e gases brutos. Déficit de saída do balanço interno significa que há concentração do elemento avaliado no forno ou pré-aquecedor.

Para elementos com alta volatilidade, como regra, balanços de equilíbrio não podem ser estabelecidos. A característica nesses balanços é um déficit sistemático no lado de saída do balanço, níveis menores de incorporação no clínquer e um crescimento da circulação forno/pré-aquecedor com o tempo (SPRUNG,1988, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p. 164).

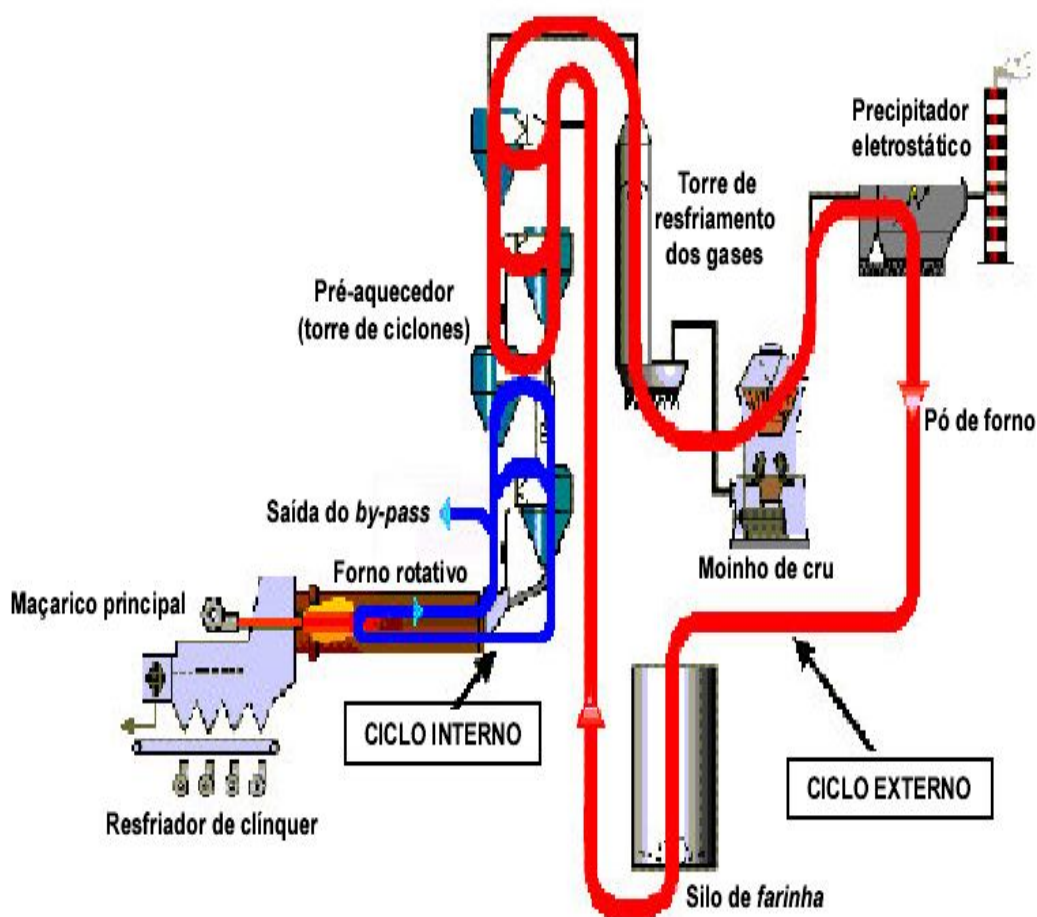


Figura 15 – Croqui esquemático identificando os ciclos internos e externos de componentes voláteis no sistema-forno com pré-aquecedor – tipo torre de ciclones.
 Fonte: CEMBUREAU (1999),

Dellinger, Perskin e Sarofim (1993) comentam que a ação de lavagem da alta carga de sólidos alimentada e o alto conteúdo de álcalis nos fornos rotativos favorecem a alta retenção de compostos metálicos no clínquer e no material particulado coletado nos equipamentos de controle de poluição atmosférica incluindo o pó de forno. Os autores citam que as emissões de compostos de metais refratários estão geralmente abaixo de 0,1% da massa alimentada podendo ser tão baixos quanto 0,001% para os compostos metálicos menos voláteis. As emissões de compostos metálicos semi-voláteis geralmente situam-se abaixo de 0,5% da quantidade alimentada. Dellinger, Perskin e Sarofim (1993, apud, MANTEGAZZA, 2004, p.166)

Comentam também que os dados relativos à retenção do mercúrio nas fases sólidas são altamente variáveis e cercados de incertezas devido às

dificuldades de análise das concentrações traços do metal nessas matrizes, bem como às dificuldades de coleta dos constituintes vaporizados nos gases emitidos. Consideram prudente a prática atual adotada pelas indústrias, de não introduzir os compostos contendo mercúrio nos fornos, devendo ser mantida.

Ainda que a partição desses grupos de metais seja afetada pelas condições de operação do forno, os metais refratários tendem a se concentrar no clínquer, enquanto os metais voláteis e semi-voláteis tendem a ser descarregados através dos sistemas de exaustão.

2.5.22. Emissões de orgânicos

A principal fonte de emissão de compostos orgânicos voláteis em chaminés de fornos de clínquer é a matéria orgânica presente ou ligada à matéria-prima, da qual uma parte é liberada quando exposta ao calor no sistema-forno. Alguns dos compostos orgânicos expelidos são oxidados, mas outros saem do forno como emissões orgânicas (CEMBUREAU, 1999).

Araújo (2002) refere que a exemplo do monóxido de carbono, as emissões de hidrocarbonetos são atribuídas à queima incompleta de combustíveis, a qual ocorre quando há deficiência de oxigênio no processo de combustão ou o abaixamento da temperatura da chama. Outros fatores podem também provocar a formação de hidrocarbonetos no processo de queima como a baixa turbulência e o insuficiente tempo de residência dos gases no interior da câmara de combustão.

Dellinger, Pershing e Sarofim (1993) relatam que existe uma considerável quantidade de dados indicando que os fornos de clínquer podem destruir qualquer composto orgânico líquido alimentado atomizado na zona de queima com uma eficiência maior que 99,9999%, sem levar em consideração a sua estabilidade térmica, sinônimo de sua dificuldade de destruição. Esse nível de eficiência é teoricamente razoável devido às altas temperaturas e longo tempo de residência da fase gás nesses fornos. As condições extremas de combustão no processo de manufatura do clínquer rapidamente superam qualquer deficiência nas concentrações de oxigênio. Dellinger, Perskin e Sarofim (1993, apud, MANTEGAZZA, 2004, p.167)

Os autores consideram ainda que quando a combustão ocorre fora das condições ideais favorece a formação dos produtos de combustão incompleta (PIC's), que podem resultar na geração de milhares de compostos orgânicos diferentes.

Araújo (2002) comenta que dentre a grande variedade de hidrocarbonetos gerados em processos de combustão os de maior destaque são os aromáticos, compostos cíclicos que formam anéis de benzeno, os quais podem estar combinados com outros compostos orgânicos e inorgânicos ou com outros anéis.

Por último, além de todos os poluentes gerados no sistema forno citado acima ocorrem também as emissões de dioxinas e furanos que são compostos formados de maneira não intencional em todos os processos de combustão onde estão presentes o carbono, o oxigênio e o cloro.

2.5.23. Equipamentos de Controle de Poluição – ECP

Nas indústrias de cimento utiliza-se basicamente dois tipos de filtros para controle das emissões geradas pelos gases de combustão no sistema forno: Filtros de mangas e eletrostáticos .

Antes dos gases do forno entrarem no filtro eles são resfriados por um equipamento denominado de torre de arrefecimento.

Os gases entram pelo topo da torre, e são resfriados através da injeção de água. A retirada destes gases da torre é feita por um ventilador. Existem dois tipos padrão de seção de entrada e a escolha depende da instalação e posição do ventilador.

Em geral, os gases são alimentados a torre entre 300 e 400°C, e saem a 150°C. A pressão de trabalho destes equipamentos fica entre 300 e 800 mm CA. A água utilizada para resfriar o gás é previamente filtrada. Água contendo mais que 500 mg CaCO_3 / l H_2O pode causar problemas.

A água é estocada em dois reservatórios, de onde passa através de um filtro duplo (50 – 100 micra) para promover a purificação. Em seguida, é bombeada para o sistema de bocais a uma pressão de 35 bars. Todos os bocais, os quais atomizam somente por pressão, são alimentados pelo mesmo tubo, com um retorno comum para o reservatório.

Cada bocal é ajustado com um filtro e duas válvulas de não - retorno para reter impurezas e para minimizar o refluxo de água caso a bomba pare de operar. O bocal principal está disponível com um, três ou quatro bocais auxiliares.

O processo de resfriamento é monitorado por um sensor de temperatura, no gás de saída. Uma temperatura constante depende de uma regulação constante da injeção de água.

O pó que não é carregado até o filtro é coletado no fundo da torre e extraído por um transportador de correntes. Como a umidade neste pó acumulado pode causar dificuldades de transporte, um termo sensor é ajustado para registrar as variações térmicas, alarmando em condições críticas.

2.5.24. Filtros Eletrostáticos

Por mais de sessenta anos, os filtros eletrostáticos tem sido usados com sucesso na limpeza de gases em indústrias de cimento e também em outros processos industriais. Um campo de larga aplicação destes precipitadores são caldeiras que queimam carvão. A emissão de particulado aceita, expressa em mg/m^3 de gás (em condições normais de temperatura e pressão), está em torno de 50 mg/Nm^3 ou mesmo abaixo disto.

Os filtros eletrostáticos ou precipitador eletrostático são conhecidos como sensíveis às propriedades físicas do gás e do pó, por exemplo, resistividade, ponto de orvalho, temperatura, dentre outros. Frequentemente o precipitador eletrostático sofre quando estes parâmetros flutuam ou diferem de valores ideais. A temperatura é uma simples propriedade que apresenta significativo impacto na eficiência do precipitador eletrostático.

Temperatura do gás acima de valores standard, provocam queda de performance no precipitador. Flutuações de temperatura, causam instabilidade no filtro e aumentam o período de baixa eficiência. Para uma boa performance do precipitador eletrostático, a temperatura do gás deve ser a mais constante possível.

Para um controle efetivo desta temperatura, pode – se instalar um sistema de regulação termodinâmico. O coração deste sistema é um PLC, que controla a quantidade de água injetada na torre de arrefecimento baseando – se no cálculo do calor total disponível no gás por evaporação da água. Caso o sistema não consiga identificar as variáveis necessárias para o cálculo, a injeção de água volta a ser

controlada pela temperatura de saída do gás. A eficiência de coleta de um precipitador é definida como a porcentagem pó retida:

Onde,

$$\eta = \frac{Se - Ss}{Se} \cdot 100$$

- Se – concentração de pó na entrada do precipitador, em g/Nm³;
- Ss – concentração de pó na saída do precipitador, em g/Nm³;
- η - eficiência de coleta, em % .

A eficiência de coleta é tradicionalmente expressa pela fórmula clássica:

$$\eta = 1 - e^{(-\omega \cdot \frac{A}{Q})}$$

Onde,

- η - rendimento de coleta;
- A – área das placas de coleta, em m²;
- Q – fluxo de gás, em m³/s;
- ω - velocidade de migração da partícula, m/s.

Esta velocidade de migração pode ser considerada como a velocidade na qual as partículas se movem em direção aos eletrodos de captação, sem influência de forças elétricas e de condições de turbulência no fluxo. Esta velocidade depende das propriedades do gás e do pó, do design do precipitador e da energização.

Esta fórmula clássica é aplicada para partículas esféricas de tamanho uniforme. Para o pó encontrado na prática, a velocidade média de migração da partícula é reduzida a medida que o gás passa através do precipitador.

Como é de se esperar, partículas finas são mais difíceis de serem captadas que as grossas. Como o filtro eletrostático opera aplicando uma força elétrica diretamente sobre cada partícula de pó, consegue reter até mesmo as partículas menores.

Possivelmente a mais importante propriedade do pó é a resistividade (resistência elétrica específica). Esta resistividade depende da composição química

e física e da distribuição granulométrica do pó, e também da composição, umidade e temperatura do gás. Geralmente a resistividade do pó do 4º estágio de um forno com pré – aquecedor é maior que a do pó de um forno via úmida. Isto porque o pó de um forno via seca possui menor umidade que o pó de um forno via úmida. Pó de resfriadores de clínquer apresentam um baixo teor de álcalis solúveis em água e está suspenso em um gás extremamente seco. Ambos os fatores contribuem para uma alta resistividade. No processo de cimento, a umidade é a propriedade mais importante do gás, pois influencia diretamente a resistividade do pó.

2.5.24.1. Princípio de funcionamento

O desenho da figura 16 mostra uma vista em perspectiva de um precipitador eletrostático.

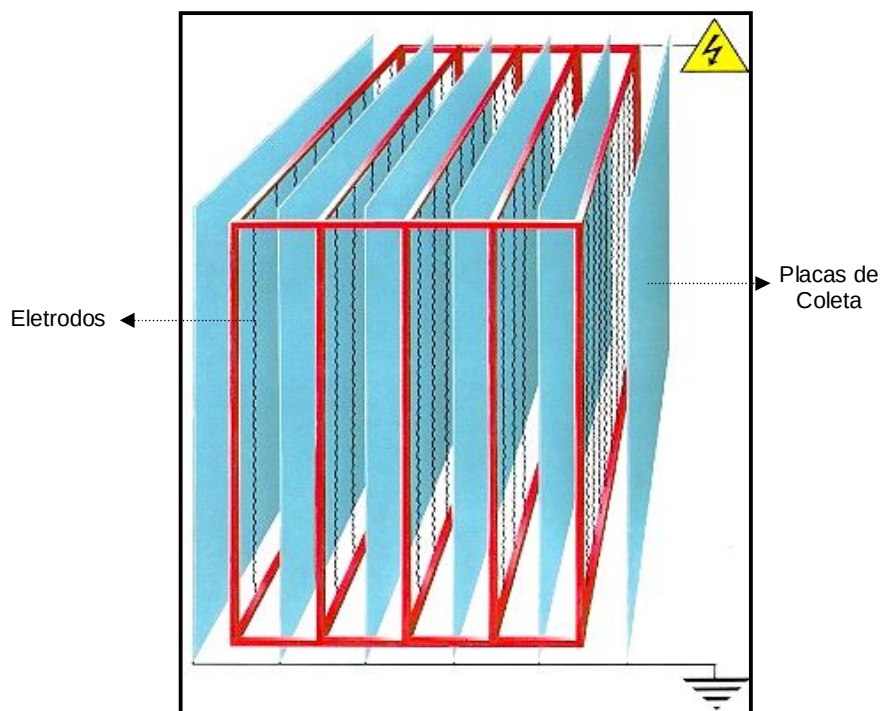


Figura16 – Vista interna de um filtro elétrico.

Fonte: FS smitht.

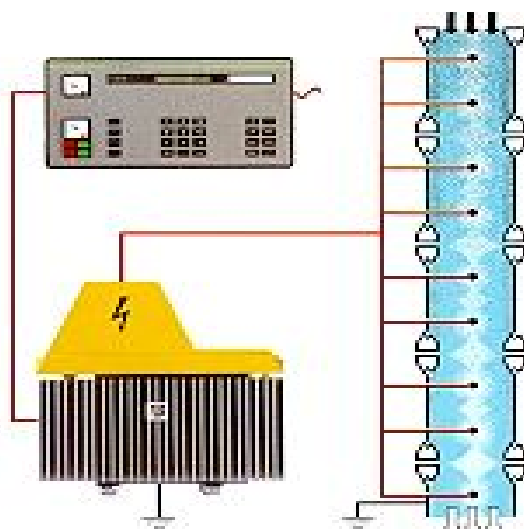


Figura 17 – Seção do duto do filtro elétrico.

Um precipitador industrial tem um número de tubos através dos quais os gases passam a uma velocidade de mais ou menos 1 m/s. Os dutos são formados por duas linhas paralelas de placas de coleta montadas verticalmente e um número de eletrodos de descarga suspensos entre as placas de coleta.

O processo de precipitação eletrostática consiste de três etapas fundamentais:

- Carregamento elétrico da partícula;
- Coleta da partícula;
- Remoção do material coletado.

As duas primeiras etapas são funções das condições elétricas dentro do precipitador, enquanto que a terceira depende de forças mecânicas.

A seção horizontal de um duto, na figura 17 ilustra como as placas de coleta e os eletrodos de descarga estão interconectados com fornecimento de energia, tradicionalmente, um transformador retificador. A direção do fluxo de gás é indicada pelas setas e os pontos pretos ilustram como a concentração de pó decresce através do duto.

A alta voltagem negativa aplicada para isolar eletricamente os eletrodos de descarga cria um forte campo elétrico entre os eletrodos e as placas de coleta aterradas. A maior resistência ocorre perto dos eletrodos de descarga. Como a voltagem é elevada, ocorre o faiscamento do gás próximo à superfície do eletrodo

de descarga. Este faiscamento, chamado de “efeito corona”, aparece como uma luz azulada, estendendo – se por uma curta distância além da superfície do eletrodo. A radiação produz um grande número de íons, os íons positivos são imediatamente atraídos para os eletrodos de descarga, enquanto que os íons negativos são atraídos para as placas coletoras. Alguns dos íons em movimento prendem – se às partículas de pó suspensas. Partículas de pó também são carregadas por bombardeamento provocado pelos íons em movimento e por difusão iônica. Estas formas de carregamento são menos influentes do que a força do campo elétrico, porém, todas, ocorrem simultaneamente. O tamanho da partícula determina qual o tipo de carregamento predominará. Difusão iônica prevalece para partículas menores que $1\ \mu$.

A figura 18 mostra um filtro eletrostático completo.

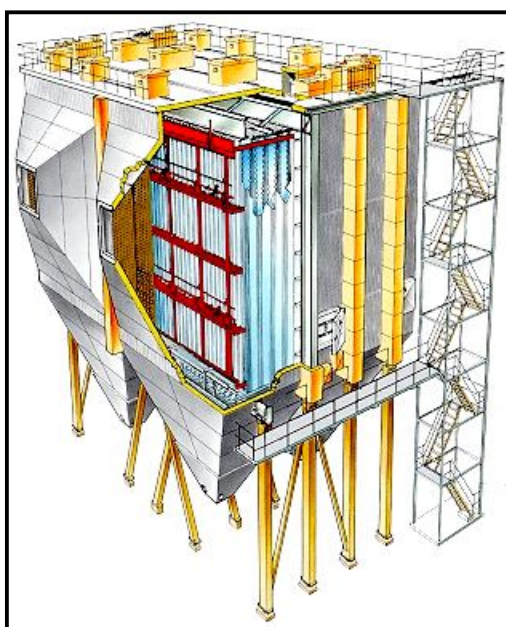


Figura 18 – Filtro eletrostático.

Fonte: FL Smith.

As partículas negativamente carregadas migram em direção às placas de coleta e aderem quando são descarregadas. Estas partículas formam uma camada de pó sobre a superfície da placa, a qual é removida por batimento.

As partículas removidas caem em direção ao fundo do precipitador, numa tremonha, de onde são extraídas por um transportador mecânico ou pneumático.

Em geral, os precipitadores eletrostáticos apresentam de 3 a 30 m de largura e de 4 a 15 m de altura. O espaçamento entre as placas varia de 250 a 400 mm. Existem três tipos: vazões médias e grandes, da ordem de 50 a 500 m³/s por câmara de precipitação e vazões pequenas, da ordem de 10 a 50 m³/s.

Na indústria cimenteira, os eletrofiltros são largamente aplicados. Geralmente são instalados após a torre de condicionamento. São equipados com arranjo especial na entrada para tratar toda produção do moinho de cru. São desenhados para trabalhar a alta pressão negativa com o moinho de cru funcionando. Em geral, apresenta base de concreto.

No layout onde recebe toda produção do moinho de cru, os gases da torre de ciclones passam primeiramente pela torre de condicionamento, arrastam a produção do moinho e vão ao filtro elétrico onde ocorre a separação.

Existe outro layout, onde parte dos gases da torre de ciclones passam pela torre de condicionamento e a outra parcela vai ao moinho de cru. Mais adiante no processo estes gases se encontram novamente indo ao filtro elétrico.

Os filtros elétricos apresentam intertravamento pelo nível de CO. Quando se atinge determinado nível de CO na corrente de gás que alimenta o filtro, ocorre desligamento do filtro para evitar problemas de explosão.

2.5.25. Filtros de mangas

O Filtro de Mangas é um equipamento versátil e eficiente, desenvolvido para filtragem industrial de gases a altas e baixas temperaturas, amplamente utilizado para recuperação de particulados (finos e grossos) e controle da poluição atmosférica na fonte (coleta de pó). Sua concepção do tipo modular, ou mais câmaras, atendem praticamente qualquer tipo de vazão requerida.

2.5.25.1. Princípios de Funcionamento

O ar carregado de impurezas entra no filtro pela moega inferior e movimenta-se para cima, já com a velocidade reduzida. As partículas são retidas na parte externa das mangas, enquanto o ar atravessa as mesmas. O ar filtrado é expelido para a atmosfera ou retorna ao processo.

A limpeza das mangas consiste na injeção do ar comprimido, de forma contínua e automática, através de aceleradores do tipo venturi, montados no plenum superior, um para cada manga. O ar comprimido introduzido nos venturis induz uma grande quantidade de ar secundário, criando uma onda de choque, com respectivo movimento simétrico no tecido filtrante, deslocando as partículas para a moega de retenção. O tempo de injeção do ar comprimido em cada fila de mangas, assim como a intermitência, ou seja, o período decorrido entre a limpeza de uma fila e a subsequente, é precisamente comandado por um temporizador eletrônico de circuitos integrados.

2.5.26. Co-processamento de resíduos industriais em fornos rotativos de clínquer

Na esfera industrial, a combustão é a reação chave de inúmeros processos de transformação. Muitos desses processos, no entanto, se passam em fornos rotativos e a indústria de cimento é, de longe, a maior usuária desses fornos. Ela operava em 1998, mundialmente, cerca de 2000 fornos para a produção de clínquer portland (WAGNER, 2004).

O co-processamento é a técnica que aproveita as condições operacionais dos fornos de clínquer (matéria-prima básica do cimento) para reciclar resíduos industriais, aproveitando o seu poder calorífico e/ou matérias-primas neles contidas. É, portanto, a produção de clínquer concomitante à queima de resíduos industriais nos fornos industriais.

Consiste de um processo de destruição térmica, como dito anteriormente, em um ambiente controlado. Quando os resíduos são expostos a temperaturas que aumentam progressivamente até cerca de 1530°C, eles tendem a se quebrar em formas mais simples e menos tóxicas. A adição de resíduos químicos combustíveis no forno pode ser feita tanto na forma sólida, quanto líquida ou pastosa.

Os combustíveis líquidos são misturados e queimados com o combustível auxiliar do forno. Parte dos sólidos e pastosos é misturada à matéria-prima e entram na parte alta do forno. Outra parte entra no forno diretamente sem passar pelo processo de pré-aquecimento.

Esta técnica de disposição final de resíduos, se utiliza da temperatura para oxidar os resíduos. O produto final não deve, porém, agregar substâncias ou

elementos em quantidades tais que possam afetar a saúde humana ou ao meio ambiente.

Os parâmetros de combustão do processo de produção de clínquer, em termos de temperatura, turbulência e tempo, são equivalentes aos preconizados para a destruição de resíduos perigosos. Portanto, a fábrica de cimento com linha de produção moderna, processo de fabricação estável, regulado e otimizado, queimadores especialmente desenvolvidos para os diversos tipos de combustíveis e dispositivos altamente eficientes de retenção de particulados e de lavagem de gases gerados na combustão tem condições técnicas para atender aos padrões de emissões exigidos pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) para queima de resíduos perigosos.

A utilização do resíduo deve representar aporte energético ou alteração benéfica da composição do clínquer, com a substituição de algum dos elementos principais – cálcio, silício, alumínio e ferro – da matéria-prima. Pode, ainda, atuar como mineralizador, flúor, titânio ou fósforo, que reduzem a temperatura de combustão.

O ciclo de vida do cimento, como não poderia deixar de ser, está diretamente relacionado ao clínquer. Assim sendo, a qualidade ambiental do clínquer Portland co-processado deve ter como propriedade a retenção de elementos traços em solução sólida, a manutenção da integridade das relações textuais e a garantia da imobilidade de componentes tóxicos no produto final, através de um sistemático controle tanto dos clínqueres quanto dos cimentos.

A química da produção do cimento é muito sensível a variações na matéria prima, de modo que as indústrias fabricantes de cimento não podem utilizar resíduos que possam causar variação na qualidade do clínquer. Se o fizessem, o cimento não conseguiria ser enquadrado nos rigorosos padrões especificados pelo ASTM (American Society of Testing Materials).

Apesar de o apelo ser forçosamente econômico, seja em virtude do custo de energia, uma vez que o combustível responde por cerca de uma terça parte do custo de produção do cimento (MARINGOLO, 2001), seja em função da ampliação da vida útil das jazidas, o clínquer co-processado com qualidade ambiental alia preservação de recursos energéticos, valorização de resíduos industriais e aumento da competitividade industrial, beneficiando o meio ambiente, a indústria e a sociedade.

Este processo está, portanto, diretamente ligado à idéia de conservação e racionalização do uso de recursos minerais e energéticos não-renováveis através do aproveitamento de resíduos industriais. Assim, o co-processamento faz parte da filosofia de equilíbrio entre os processos produtivos e a conservação ambiental. (MARINGOLO, 2001)

2.5.26.1. Breve histórico do co-processamento

As primeiras experiências com queima de resíduos em fornos de produção de clínquer foram realizadas em finais da década de 60, no Canadá, EUA e em países da Europa. Desde então essa tecnologia tem se desenvolvido e vem sendo incorporada crescentemente ao processo de produção.

De 1974 a 1976, a fábrica de cimento Saint Lawrence, no Canadá, desenvolveu testes para avaliar a eficiência de destruição de resíduos clorados em fornos via úmida. Na Europa, por exemplo, a França realizou os primeiros testes em 1978, na Cement Français (Desvres), e no mesmo ano registravam-se experimentos também com resíduos clorados na Suécia, na fábrica Stora-Vika (MARINGOLO, 2001).

Em 1995 aproximadamente 10% da energia térmica consumida nas indústrias de cimentos da Europa originaram dos combustíveis alternativos. Isso equivale a 2,5 milhões de toneladas de carvão (CEMBUREAU, 2006).

Em 1995, registravam-se, nos EUA, 45 fornos de cimento em 24 fábricas, co-processando cerca de 1.000.000 t/ano de resíduos. No Japão, onde atividades datam dos anos 1980, apenas em 1990 foram queimados 26 tipos de resíduos industriais de 252 empresas, 113.000 t como substitutos de combustível e 424.000 t como matéria-prima, gerando uma economia de 110.000 t de carvão e 382.000 t de matérias-primas, reduzindo 6,9% e 7%, respectivamente, os custos (MARINGOLO, 2001).

Na França, o aumento da quantidade de resíduos tratados conduziu a um aumento da taxa de substituição de combustíveis fósseis por combustíveis secundários de 7%, em 1988, para 52%, em 1994 (MARINGOLO, 2001). Em 2000, nos EUA, plantas de produção de clínquer substituíram o equivalente a um milhão de toneladas de carvão com a utilização de combustíveis alternativos (WAGNER, 2004).

No Brasil, as primeiras atividades de co-processamento de resíduos industriais datam da década de 90, inicialmente no estado de São Paulo, estendendo-se, então, para o Rio de Janeiro, Paraná, Rio Grande do Sul e Minas Gerais.

Levantamentos da CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, de São Paulo – apontam que, apenas no estado de São Paulo, 47% dos cerca de 21 milhões de toneladas de lixo industrial sólido produzido anualmente não são tratados pelas indústrias, sendo estes armazenados sem tratamento ou jogados em aterros (MARINGOLO, 2001).

A fim de estabelecer objetivos uniformes de parâmetros técnicos do co-processamento de resíduos em fornos de cimento, foram desenvolvidos conjuntamente por agências ambientais dos estados de Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul e São Paulo uma legislação específica sobre o tema, e publicados através da Resolução CONAMA 264/99.

2.5.26.2. Tipos de resíduos passíveis de tratamento

Resíduo pode ser definido como substância no estado sólido, semi-sólido, pastoso ou líquido, oriunda de processos industriais, incluindo-se a gerada nas estações de tratamento de efluentes líquidos ou atmosféricos, conforme definição da NBR 10.004 (ABNT, 2000).

São considerados, para fins de co-processamento em fornos de produção de clínquer, resíduos passíveis de serem utilizados como substituto de matéria-prima e ou de combustível – ou seja, materiais secundários –, desde que as condições do processo assegurem o atendimento às exigências técnicas e aos parâmetros fixados pela legislação estadual vigente que atende, no mínimo, aos requisitos estabelecidos na Resolução CONAMA 264/99. Estes requisitos são comprovados a partir dos resultados práticos do plano do teste de queima proposto. Essas regulamentações exigem que o processo agregue valor ao resíduo, de forma que o forno não se torne um mero incinerador de resíduos.

O resíduo pode ser utilizado como substituto da matéria-prima desde que apresente características similares às dos componentes normalmente empregados na produção de clínquer, incluindo neste caso os materiais mineralizadores e/ou fundentes. Além disso, o resíduo pode ser utilizado como substituto de combustível,

para fins de reaproveitamento de energia, desde que apresente algum poder calorífico.

Conforme citado no item 2.5.20, página 79 , 2º parágrafo , o resíduo deve conter uma concentração de cloro e de metais pesados tal que não afete o clínquer nem as emissões, além de seu grau de corrosão ser menor que os níveis tolerados. Normalmente, o cloro é adicionado ao forno de cimento pelas matérias-primas, tais como argila (15–450ppm) e calcário (50–240ppm). Combustíveis primários e secundários podem, também, representar mais uma fonte de cloro, podendo conter até 1100 ppm. O Cloro apresenta volatilidade muito elevada dando origem a processos cíclicos em que as concentrações tornam-se cada vez maiores com o passar do tempo.

O co-processamento pode, portanto, tratar ácidos e bases, cianetos e arseniatos, além de sais de quase todos os metais, exceto os de mercúrio, cádmio e tálio. Também é vedado o tratamento de agrotóxicos, organoclorados, materiais radioativos, explosivos, material infeccioso, lixo hospitalar, resíduo domiciliar bruto e de bifenilas policloradas (PCB's).

No entanto, a oxidação termal de PCB's em fornos de cimento é tecnicamente viável, contanto que uma adequada dosagem seja realizada. Isso foi inclusive comprovado com testes realizados no Canadá, Suécia e EUA. É necessário, porém, treinar processadores e agentes fiscalizadores para essa perspectiva.

Organoclorados, dada a agressividade dos seus compostos, podem causar desgaste prematuro e/ou danos aos revestimentos e outras peças dos fornos, principalmente, através da formação de Cl_2 e HCl em altas temperaturas. O HCl facilita a formação de sais alcalinos que se condensam, provocando entupimentos no forno (MANTUS, 1992). Além do mais, compostos de cloro têm a propriedade de baixar a temperatura de volatilização de metais pesados (MARINGOLO, 2001).

Alguns exemplos de tipos de resíduos passíveis de tratamento são os petroquímicos, químicos e de destilações, areia ou terra contaminadas com óleo, torta de filtração, substâncias oleosas, pneus usados, polietileno, polipropileno, poliestirenos, PVC, acrílico, poliésteres, entre outros. Além disso, pode-se também utilizar corantes, tintas, vernizes, catalisadores usados, produtos fotográficos, lodos

de esgoto, resinas, colas, látex, materiais de refino, madeira contaminada, embalagens de produtos químicos, substâncias inorgânicas, entre outros.

Um exemplo clássico é a escória de alto forno. Estimava-se em 1997 que cerca de 4,6 milhões de toneladas por ano de escória siderúrgica e 1,2 milhões de toneladas por ano de cinzas volantes substituíam o equivalente a 7,2 milhões de toneladas por ano de bens minerais não renováveis ao serem co-processados (MARINGOLO, 2001).

Existem, no entanto, ainda outros exemplos tais como, lama de carbonato de cálcio da indústria de papel, lodo proveniente da reciclagem de papel, lodo de processos de galvanização, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de usinas de acetileno, pó de grafite, cinzas volantes de usinas termelétricas, lama vermelha do processo Bayer, palha de arroz, casca de coco, caroço de azeitona, pó de madeira, embalagens de bateria, óleos, entre outros.

O co-processamento desses resíduos envolve a identificação dos parâmetros de operação normais do forno, uma vez que estes devem oferecer as melhores condições para o seu processamento, e o local de introdução no forno, pois uma boa mistura com a carga deve ser promovida além de sua total combustão.

Vale ressaltar que a utilização de resíduos e/ou suas misturas como combustível e matéria-prima alternativa devem, no entanto, manter inalterada a qualidade do produto (cimento) e os níveis de emissões do forno. (MARINGOLO, 2001)

2.5.26.3. Limitações na utilização de resíduos

A quantidade de combustível alternativo co-processado no forno de clínquer está diretamente relacionada com a energia térmica nele contida.

Isso se deve ao fato da maioria dos combustíveis alternativos terem capacidade calorífica menor do que a dos tradicionais, tais como: coque de petróleo, óleos pesados e pó de carvão.

Combustíveis tradicionais liberam de 6.000 a 8.000 quilocalorias por quilo queimado, contra cerca de 2.500 quilocalorias, em média, dos alternativos (Própria do autor).

Caso não haja uma boa dosagem, o forno resfria e o risco de formação de compostos químicos tóxicos que não ficam retidos nem nos filtros mais eficazes é grande.

Na maioria dos fornos em operação o combustível alternativo representa entre 10 a 15% de todo o combustível utilizado na produção de cimento. No entanto, especialistas mais otimistas afirmam que a fração máxima pode chegar a 15 a 25% (WAGNER, 2004), dependendo do resíduo. Essa porção poderá aumentar à medida que pesquisa e desenvolvimento tecnológico nesta área aconteçam.

2.5.26.4. Vantagens do co-processamento

O forno de cimento é considerado um dispositivo adequado para tratamento de resíduos. Consideramos as vantagens em dois aspectos : econômico e ambiental .

Vantagens Ambientais :

- Altas temperaturas de incineração e tempo de residência, levando a uma melhor consumação dos resíduos combustíveis e inertização dos demais;
- Ambiente alcalino natural – tanto na calcinação do carbonato de cálcio, quanto no processo de produção do clínquer, são produzidos componentes alcalinos. Assim, dentro do forno rotativo o ambiente é naturalmente alcalino, agindo como neutralizador natural dos ácidos que podem vir a ser produzidos pela combustão, como o HCl. Portanto, à medida que os gases ácidos transitam no sistema, estes são neutralizados pelo material alcalino do forno;
- Alta turbulência – a turbulência (expressa em número de Reynolds) é o fenômeno que promove a mistura do combustível com o oxigênio, produzindo uma combustão mais eficiente. Em fornos de cimento, como expresso na Tabela 11, o número de Reynolds é maior que 100.000 contra 10.000 em incineradores industriais, permitindo, portanto, maior eficiência de destruição de compostos orgânicos e inorgânicos;
- Processo sem geração de cinzas – o produto gerado é reciclado e realimentado no forno junto à farinha, num processo fechado. Já em um incinerador, há produção de cinzas que são, na maioria das vezes, um resíduo perigoso que precisa ser disposto;

- Estabilidade térmica – devido às dimensões e à alta capacidade de calor que caracterizam o forno, não é possível haver variações significativas de temperatura em períodos curtos de tempo. A operação é estável e uniforme, e conta com dispositivos de interrupção automática do fluxo de resíduos em caso de falhas nas condições operacionais;
- Equipamento de despoeiramento de alta eficiência;
- Habilidade do clínquer de assimilar teores controlados de cinzas sem detrimento das propriedades do cimento;
- O co-processamento é uma alternativa direta à utilização de incineradores.
- Utilização do poder calorífico do resíduo a favor de sua própria destruição, além de fornecer energia; conservação de fontes de energia não renováveis, uma vez que o cimento é cerca de 4,4 milhões de BTU (MANTUS, 1992);
- Carga de resíduo – fornos de cimento típicos têm, em média, uma capacidade de alimentação de 100 ton/h, com uma carga de resíduos tipicamente de aproximadamente de 5%, ou seja, 5 ton/h. Para fins de comparação, um incinerador industrial de resíduos perigosos representa um investimento de US\$ 20 milhões, para uma taxa de alimentação de somente 100 a 150 kg/h (WAGNER,2004);
- Conservação de fonte de energia não renovável, uma vez que o processo de produção de cimento é extremamente consumidor de energia. A energia média requerida para produzir uma tonelada de cimento é de 4,4 milhões de BTU (MANTUS 1992);
- Total destruição do resíduo e retenção das cinzas na matriz do clínquer (processo fechado);
- Efetiva solubilização dos metais nas fases do produto, uma vez que a interação entre a carga e o resíduo se processa durante as reações de formação das fases constituintes do clínquer de uma forma homogênea durante o aquecimento, até a faixa de 1500°C;
- Longos períodos de residência a altas temperaturas (5 a 6 segundos) a 1450°C, contra cerca de 2 segundos, no incinerador, à temperatura inferior a 1300°C, com a vantagem do contato íntimo entre o sólido e o gás;
- Vapores ácidos de queima são neutralizados pela atmosfera alcalina do processo;

- Nível de emissões dentro dos parâmetros ambientais;
- Eliminação dos riscos de geração de passivos ambientais;
- Auto-monitoramento contínuo, facilitando, portanto, a fiscalização pelos órgãos controladores da qualidade do meio ambiente

Vantagens Econômicas:

- O co-processamento é de 5 a 10 vezes mais barato que as formas convencionais de incineração. Em 1993, o preço cobrado para incineração variava entre US\$ 1.000,00 a US\$ 3.000,00 a ton, dependendo do tipo de resíduo. A disposição em aterros podia custar até US\$ 150,00 a ton, enquanto a queima em fornos de cimento variava entre US\$ 100,00 a US\$ 700,00 (MARINGOLO, 2001). Atualmente, o setor de cimento cobra, em média, R\$ 80,00 por ton de resíduo queimado (própria do autor);
- O capital investido para modificações necessárias nas instalações de produção de clínquer é apenas uma parcela do necessário para a instalação de uma nova unidade de incineração;
- Enorme quantidade de fornos de cimento espalhados pelo país que podem ser aproveitados para eliminar resíduos industriais
- Aumento dos impostos recolhidos e geração de empregos para a comunidade vizinha.

Algumas vantagens da utilização de forno de cimento a incineradores típicos são mostradas na Tabela 11.

Tabela 11 - Características de um forno de cimento e comparação com um incinerador típico, na combustão de resíduos.

Medida	Forno de Cimento	Incinerador típico de resíduos perigosos
Temperatura máxima do gás	>2.000°C	≤ 1.500°C
Temperatura Máxima dos sólidos	1.450 - 1.500°C	≤ 1.300°C
Tempo de retenção do gás a mais de 1100°C	6 - 10 segundos	0 - 3 segundos
Turbulência (n de Reynolds)	> 100.000	> 10.000
Taxa média de alimentação do gás	100.000 - 130.000 Nm³/h	25.000 - 30.000 Nm³/h
Processamento de matéria-prima	100 t/h	nenhuma
Dimensões	50 - 230m de comprimento	5-18m de comprimento
	3 - 8 m de diâmetro	3 - 8 m de diâmetro
	1-3 rpm	0,5 - 2 rpm
Carga de resíduos	tipicamente 5% (5 t/h)	100%
Produto	cimento	nenhum

Fonte: Wagner, 2004.

2.5.26.5. Desvantagens do co-processamento

Resíduos e subprodutos industriais introduzidos com a farinha ou combustíveis são fontes significativas de elementos com baixos percentuais até traços, os quais podem trazer implicações ao processo e influenciar as propriedades do clínquer. Isso porque podem: alterar a temperatura de formação de fases do clínquer; alterar a estabilidade termodinâmica relativa às fases do clínquer em consequência da solução sólida; agir sobre a atividade hidráulica do cimento ao alterar a reatividade das fases do clínquer por solução sólida e/ou defeitos de simetria dos cristais.

Portanto, para incorporar resíduos em um co-processamento, deve-se fazer um cuidadoso estudo prévio, avaliando as possíveis consequências às propriedades do clínquer. A qualidade do cimento deve ser mantida, uma vez que interessa tanto ao produtor quanto ao consumidor que o produto atenda às especificações estabelecidas pela norma técnica (ABNT, 1991 a, b, c).

Outra questão que deve ser considerada é o custo dos equipamentos de limpeza de gases e despoeiramento necessários. Para executar o co-processamento, o qual tem emissões mais restritas de acordo com a legislação, deve-se investir neste tipo de equipamentos de proteção ambiental.

2.6. SISTEMA DE GESTÃO AMBIENTAL

2.6.1. Evolução da Gestão Ambiental

A Gestão Ambiental nas empresas pode ser definida como aquela parte da função gerencial global que trata, determina e implementa a política de meio ambiente estabelecida para própria empresa. De maneira mais específica, o dicionário de vocabulário básico de meio ambiente define Gestão Ambiental como: “tentativa de avaliar valores e limites das perturbações e alterações que, uma vez excedidos, resultam em recuperação demorada do meio ambiente, de modo a maximizar sua produtividade prolongada e de longo prazo”.(MANUAL DE AUDITORIA AMBIENTAL, QUALITYMARK, 2001).

Com o aumento da intensidade e das consequências dos acidentes ambientais, como o vazamento de gás tóxico, em 1984, em Bhopal, na Índia, que

causou cerca de duas mil mortes, a indústria química criou o Programa de Atuação Responsável (Responsible Care).

Em 1984, foi criado no Canadá, pela “Canadian Chemical Producer Association” (CCPA) a Atuação Responsável. Desde então, o programa vem sendo implantado em diversos países nas indústrias químicas em operação, tornando-se um instrumento de gerenciamento ambiental e de prevenção de acidentes, ou seja, uma ferramenta de proteção ambiental, segurança e apoio à saúde ocupacional do trabalhador.

As novas concepções de gestão empresarial têm como princípio estabelecer uma cultura voltada para atender as necessidades dos clientes do ponto de vista da qualidade e atender as necessidades da sociedade em questões ambientais. Uma das primeiras etapas é a definição de uma política da qualidade³ (*), inclusive ambiental, colocando a atividade industrial em foco para promoção de um real desenvolvimento sustentável. A integração com o ecossistema e os meios político, econômico e social, o uso racional dos recursos naturais e a conservação da energia encontram em organizações industriais ampla margem de aplicação. O setor produtivo passa a ser visto não só como uma alavanca para o crescimento dos países, mas também como um propiciador de condições e recursos para solucionar os problemas ambientais existentes. Essa nova proposta é resultado de um longo percurso, que passa desde a maior conscientização dos consumidores em relação à manutenção de um meio ambiente saudável até a maior rigidez da legislação e da atuação dos órgãos reguladores ambientais.

Os comportamentos ambientais da empresa (reativo ou pró-ativo) acabam influenciando a criação de funções e estruturas específicas, internas à organização e se divide em três (3) estágios: 1) Controle ambiental de fim de linha; 2) Integração do controle ambiental às práticas e processos industriais e 3) Integração do controle ambiental à gestão administrativa.

No primeiro estágio, controle ambiental de fim de linha, a preocupação principal das empresas limita-se a evitar acidentes locais da mesma forma como

³Política da qualidade – Entende-se pela diretriz de atuação da empresa em praticar qualidade nos diferentes setores: produtivo, comercial, marketing, expedição, recursos humanos e outros. No entanto, a integração da responsabilidade ambiental à estrutura organizacional da empresa é uma prática relativamente recente. Assume distintas formas e funções no organograma da empresa desde uma simples divisão do controle da poluição na linha de produção, até a coordenação geral de uma corporação, departamentos em nível de corpo administrativo, associados ou não ao planejamento estratégico, departamentos de meio ambiente vinculado ao marketing, entre outras opções.

combatem o acidente de trabalho, com a criação de um setor de Meio Ambiente e Segurança. Em função de maiores exigências à legislação ambiental, surge a função de controle da poluição como anexo da função de produção. Mantém-se a mesma estrutura da indústria, se acoplados equipamentos de controle de poluição, “poluir para depois despoluir” resume esse estágio preliminar.

No segundo estágio, integração do controle ambiental às práticas e processos industriais, o controle ambiental passa a integrar a função de produção, suas práticas e processos produtivos, além da simples atividade de controle da poluição. O princípio básico passa a ser da prevenção, envolvendo a seleção das matérias-primas, o desenvolvimento de novos processos e produtos, reaproveitamento de energia, reciclagem de resíduos e a integração com o meio ambiente.

No terceiro estágio, integração do controle ambiental à gestão administrativa, ainda minoritária entre as empresas, a proteção do meio ambiente deixa de ser uma resposta às multas e sanções. Inscreve-se em um cenário de competitividade e oportunidade, na busca de manter-se na concorrência e a própria permanência no mercado. Firma-se assim, o conceito de “excelência ambiental” que avalia a empresa não somente pelo seu desempenho produtivo e econômico, mas por seus valores éticos e pelo desempenho ambiental. A função ambiental deixa de ser uma função exclusiva da produção para tornar-se uma função da administração. Interfere no planejamento estratégico, nos desenvolvimentos das atividades de rotina, na discussão dos cenários alternativos e, conseqüentemente, na análise da sua evolução, gerando políticas, metas e plano de ação. Dessa forma com a implantação de um Sistema de Gestão Ambiental as empresas passaram a interagir com esse novo cenário econômico, político e social e, portanto, participar das questões ambientais do país.

2.6.2. Auditorias Ambientais

2.6.2.1. Introdução

A Auditoria é um instrumento que tem história recente no campo ambiental. Ela inicialmente foi utilizada para uma avaliação sistemática da atividade produtiva que tivesse algum risco potencial de acidente. As verificações periódicas

que se tornaram rotineiras passaram a ser sistematizadas e evoluíram para um monitoramento contínuo do processo, influenciados pelos procedimentos adotados para a operação das plantas industriais. Ficou claro que o novo instrumento se consolidava, passando a ter uma função interativa: ao mesmo tempo em que avaliava, identificava as distorções no conjunto de etapas do processo produtivo.

Esse instrumento de avaliação permanente começou a ganhar destaque e logo se mostrou uma ferramenta que possibilitava um retrato instantâneo do processo produtivo. Com a Auditoria Ambiental passa a ser possível identificar os pontos fracos e pontos fortes, nos quais não se registram problemas na maioria das análises. A aplicação sistemática e periódica desse instrumento de verificação possibilita uma análise estatística das ocorrências de falhas mais frequentes.

Paralelamente, a legislação ambiental se ampliava e se tornava mais rígida em relação aos impactos ambientais causados pelas atividades produtivas. Já existia, entretanto, uma legislação trabalhista que exigia condições seguras e saudáveis de trabalho. Esta legislação motivou inicialmente, os processos de verificação periódica que viriam a ser chamadas de auditoria de segurança. Com a evolução das legislações ambientais e a maior complexidade dos processos produtivos, o acompanhamento das variáveis ambientais começou a ser tornar essencial. As Auditorias que eram voltadas para segurança e saúde do trabalhador passaram a se tornar, também, ambientais.

Houve, entretanto, uma mistura dos campos de atuação da auditoria. Atualmente, em algumas empresas não há diferenças entre Auditorias de segurança e a ambiental, o que torna difícil a comparação dos resultados da sua aplicação. Com essa evolução, surge a necessidade de se estruturar um sistema que ao ser avaliado pudesse ser utilizado para realizar uma radiografia instantânea da situação ambiental da empresa e, também, como referências para recomendações de ações corretivas.

2.6.2.2. Definição e Objetivo

A Auditoria Ambiental é um retrato momentâneo do desempenho ambiental da empresa. Ela revela se a empresa está ou não atendendo naquele momento o padrão ambiental definido nos critérios da Auditoria.

Consiste em um processo de avaliação sistemática e independente que detectará adequações ou não-adequações que serão corrigidas pelo auditado, conforme seu interesse e recursos. Deve, portanto, estar baseada em regras pré-definidas, como por exemplo, leis e normas. É, portanto, um instrumento usado para controlar o atendimento a requisitos, políticas, práticas e procedimentos.

É uma atividade documentada sendo, portanto, necessário pré-estabelecer os pontos a serem verificados, a forma de verificação, a amostragem, os critérios de aceitação e a apresentação de propostas de ações corretivas.

A Auditoria Ambiental requer planejamento e organização, e esta deve ter objetivo definido e documentado. Sua realização deve ser feita por pessoal qualificado, independente, imparcial e que possua credibilidade para executar a atividade.

Portanto, a Auditoria Ambiental não elimina a possibilidade de ocorrer um acidente ambiental, mas pode mitigar esta possibilidade.

Para que a Auditoria seja um instrumento eficaz, deve ser feita regularmente, deve estar inserida em um programa de gestão e deve ter a garantia de que as medidas corretivas das não-conformidades sejam implementadas.

2.6.2.3. Classificação

Segundo o levantamento feito na literatura pesquisada, as Auditorias podem ser classificadas:

Quanto ao tipo:

a) Auditoria de Adequação – é um parecer sobre a adequação de um sistema a requisitos específicos que podem estar relacionados em documentos contratuais, métodos normalizados ou métodos internos da organização, normas internacionais, regionais ou nacionais ou ainda documentos de organismos regulamentadores. A base de informações para esta auditoria consistirá em documentos tais como manuais, procedimentos, informativos, instruções, etc.

b) Auditoria de Conformidade – neste tipo de auditoria, o auditor procura evidências objetivas e claras de que o auditado trabalha de acordo com as instruções documentadas. Mesmo que a finalidade desejada seja alcançada, pode

ser que o auditado não esteja trabalhando exatamente como descrevem as instruções. Neste caso, as instruções terão de ser modificadas ou esclarecidas.

Quanto à organização:

a) Auditoria Interna – é a auditoria realizada sob responsabilidade da própria organização. A equipe de auditores internos não deve ser formada por pessoas que tenham responsabilidade direta sobre as atividades a serem auditadas. A auditoria interna tem a vantagem de deixar auditores e auditados à vontade para discutir os resultados, mas tem a desvantagem de poder mascarar resultados indesejáveis;

b) Auditoria Externa – é a auditoria realizada sob responsabilidade de uma organização independente. Além da vantagem da independência, há também o fato de que os auditores trazem experiências vividas em outras organizações.

Quanto à programação:

a) Auditoria Interna Inicial – é a primeira auditoria realizada pela própria organização;

b) Auditoria Interna de Acompanhamento ou “Follow-up” – é a auditoria interna onde são abordados os pontos pendentes de Auditorias anteriores;

c) Auditoria Interna de Manutenção ou Periódica – é a auditoria interna que verifica se o sistema está mantendo-se ao longo do tempo. É feita periodicamente;

d) Auditoria Externa Inicial ou de Qualificação – é a auditoria externa feita para qualificar o sistema. Tem um prazo de validade determinado;

e) Auditoria Externa de Acompanhamento ou “Follow-up” – é a auditoria externa feita para acompanhar pendências de Auditorias anteriores;

f) Auditoria Externa de Manutenção ou Periódica – é a auditoria externa que verifica se o sistema continua atendendo aos requisitos verificados na fase de qualificação ou requalificação. É feita por amostragem. Não avalia todo o sistema. As mesmas atividades não devem ser abordadas quando as Auditorias forem entre qualificação e requalificação ou entre requalificações;

g) Auditoria Externa de Requalificação – é a auditoria externa que tem por finalidade requalificar o sistema, por um período determinado, após término no prazo de qualificação anterior.

Quanto à aplicação:

a) Auditoria Preventiva – é uma auditoria de rotina que visa evitar a tendência natural e eventual de afastamento dos requisitos pré-estabelecidos, reduzir retrabalhos e rejeições, verificar a adequação de processos ou procedimentos utilizados e/ou sua efetiva execução e ainda, no caso de trabalhos que não podem ser controlados a partir de determinado estágio, se eles são realizados nas condições exigidas de qualidade de execução e confiabilidade;

b) Auditoria Corretiva – é a auditoria feita quando não-conformidades estiverem ocorrendo. Os auditores devem identificar as causas e dar soluções. As soluções podem ser provisórias até que se tenha a definitiva.

Quanto à classificação:

a) Auditoria de Conformidade Legal (“Legal Compliance Assessment”) - tem o objetivo de avaliar a adequação da organização com a legislação e os regulamentos aplicáveis à sua atividade. Em geral, faz parte da Auditoria do Sistema de Gestão Ambiental, quando definido no escopo da auditoria;

b) Auditoria de Desempenho Ambiental (“Environmental Performance Assessment”) – tem o objetivo de avaliar a conformidade da organização a requisitos legais e os indicadores de desempenho ambientais setoriais aplicáveis à unidade. É complementar à Auditoria de Conformidade Legal;

c) Auditoria de Sistema de Gestão Ambiental (“Environmental System Assessment”) – em por objetivo avaliar a conformidade do Sistema de Gestão Ambiental (cumprimento dos princípios, adequação e eficácia) aos requisitos estabelecidos em normas internacionais, regionais ou nacionais e seus próprios requisitos, assim como requisitos de clientes, organismos regulamentadores, usuários e certificadores;

d) Auditoria de Certificação – tem por objetivo avaliar a conformidade da organização com princípios estabelecidos nas normas pelas quais a empresa esteja tentando se certificar. No caso da Certificação Ambiental pela série ISO 14000, esta auditoria é muito semelhante à Auditoria de Sistema de Gestão Ambiental;

e) Auditoria de Descomissionamento (“Decomissioning Assessment”) – tem o objetivo de avaliar os danos ao ecossistema e à população de entorno da organização em consequência da interrupção definitiva de suas atividades;

f) Auditoria de Responsabilidade (“Due Diligence Assessment”) – tem por objetivo avaliar o passivo ambiental da organização. Em geral, é usada quando são necessárias análises para fusões, aquisições diretas ou indiretas ou ainda para fornecimento de financiamento para organizações, uma vez que avalia as responsabilidades ambientais efetivas e potenciais. Esta auditoria indica os possíveis riscos e responsabilidades (valorados quando possível) aos futuros compradores. Considera-se passivo ambiental: multas, taxas e impostos ambientais a serem pagos; investimentos para implantação de procedimentos e tecnologias necessários ao atendimento às não-conformidades; gastos com a recuperação de áreas degradadas e indenização à população eventualmente afetada pelas atividades da organização.

Quanto ao Grau de Independência:

a) Auditoria de Primeira Parte ou Auditoria Interna – é feita pela própria organização, com o objetivo de avaliar que o sistema atende a determinados requisitos anteriormente definidos. Neste caso, há pouca formalidade uma vez que a Auditoria é realizada para comprovação de competência ou conformidade do sistema para si próprio;

b) Auditoria de Segunda Parte ou Auditoria de Compradores - é feita por comprador ou usuário com a intenção de comprovar que o sistema de seu fornecedor atende a seus requisitos. Neste caso, a formalidade é reduzida pelo fato que a Auditoria está sendo realizada por interesse próprio;

c) Auditoria de Terceira Parte ou Auditoria Independente – é feita por organização independente das partes envolvidas e tem o objetivo de comprovar que um determinado sistema atende a requisitos acordados entre as partes interessadas. Estes requisitos podem estar referenciados a normas e podem também ser requisitos estabelecidos em documentos legais e requisitos de clientes e usuários. Neste caso, é necessário que o processo seja formal para garantir a independência.

Usualmente, as Auditorias mais conhecidas e praticadas são as de Certificação, as de Conformidade Legal, as de Segunda Parte e as Auditorias Internas.

2.6.2.4. Pré-requisitos para o sucesso da Auditoria

Para que a Auditoria seja bem sucedida, é necessário, em primeiro lugar, que haja comprometimento da alta direção da organização e que o objetivo e escopo sejam muito bem definidos, de forma objetiva e documentada. O sucesso da Auditoria também dependerá dos recursos, do acesso a toda a informação necessária, do plano de trabalho, da cooperação dos auditados e da conduta e experiência da equipe de auditores.

2.6.2.5. Legislação

No caso da Auditoria Ambiental de Conformidade Legal, a verificação do cumprimento da legislação ambiental em todos os níveis (federal, estadual e municipal) é seu objetivo principal. Em alguns Estados e Municípios a legislação já prevê a realização de Auditorias Ambientais: Estado do Rio de Janeiro, Estado do Espírito Santo, Estado de Minas Gerais, Município de Santos e Município de Vitória.

Já no caso da Auditoria de Sistema de Gestão Ambiental, é necessário verificar se a organização estabelece e mantém procedimentos para identificar e ter acesso à legislação. Como esta Auditoria pode ter a finalidade de certificação ambiental, então o não cumprimento a requisitos pode levar a sanções. Leis, decretos, portarias e resoluções são os requisitos de entrada do Sistema. Portanto, o conhecimento e a identificação da legislação pertinente à atividade a ser auditada é primordial. Adicionalmente, como a Política da Organização tem o comprometimento de atender à legislação e considerando que a Auditoria do Sistema de Gestão deve verificar o cumprimento da Política, então a Auditoria deve avaliar se a empresa tem condições de cumprir a legislação ambiental pertinente.

É importante mencionar que há conflitos entre as exigências da legislação que regulamenta as Auditorias Ambientais como instrumento de políticas públicas e as Auditorias Ambientais baseadas em políticas internas da organização, como por

exemplo, os procedimentos para sua realização e o que se refere aos Auditores Ambientais.

A Legislação pertinente à atividade de Auditoria Ambiental disponível até o momento é:

- Lei Estadual 1898 de 26/11/1991 – Dispõe sobre a realização de Auditorias Ambientais no Estado do Rio de Janeiro;
- Decreto 21470A de 05/06/1994 – regulamenta a Lei 1898/91;
- DZ (Diretriz) 056 R.2 – Diretriz para realização de Auditoria Ambiental;
- Deliberação CECA (Comissão Estadual de Controle Ambiental) 3427 de 14/11/1995 – Aprova a DZ-056 R.2;
- Resolução SEMA (Secretaria de Meio Ambiente do Estado) 147 de 07/06/1996 – Determina a FEEMA (Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente) medidas a serem adotadas para o fiel cumprimento da Lei 1898/91;
- Deliberação CECA 3563 de 31/10/1977 – complementa a Deliberação CECA 3427 de 14/11/1995;
- A Norma ISO 14012 – Diretrizes para Auditorias Ambientais – Qualificação de Auditores é uma norma de orientação também utilizada como referência.

A implementação de um Sistema de Gestão Ambiental constitui a estratégia para que o empresário, em um processo de melhoria contínua, identifique oportunidades de melhorias que reduzem os impactos das atividades da empresa sobre o meio ambiente, simultaneamente, sua situação no mercado e suas possibilidades de sucesso.

Portanto a implementação de um SGA numa indústria de cimento que co-processa resíduo, terá como objetivo em sistematizar as etapas dessa atividade de forma a garantir que as entradas e saídas de resíduos para queima no forno de clínquer, seja de tal forma gerenciado, que as emissões atmosféricas decorrentes dessa atividade não sejam acrescidas em relação à produção de clínquer sem co-processar resíduos.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

3.1. MÉTODOS E ESTRATÉGIA METODOLÓGICA

Foi realizado um estudo de caso em uma indústria cimenteira que co-processam resíduos industriais perigosos. Foram obtidas informações a cerca da existência ou não de um sistema de gestão ambiental e sobre os fluxos de processos para queima de resíduos. Também foi coletados dados dos parâmetros das emissões atmosféricas (NO_x , SO_2 , CO, THC e MP), com o forno operando com combustível acrescido de resíduos industriais.

Foi elaborada uma tabela comparativa dos relatórios de medições das emissões atmosféricas e gráficos e acompanhada a evolução do sistema de gestão ambiental ocorrido em decorrência das Auditorias de 2ª parte na atividade de co-processamento de resíduo.

Também foram levantadas as não conformidades e as ações corretivas concluídas, como forma de demonstrar a evolução das questões ambientais em decorrência das auditorias ambientais de 2ª parte e dos relatórios legais de emissões atmosféricas.

Com o levantamento desses dados e posterior interpretação, pretende-se justificar ou não se com um Sistema de Gestão Ambiental – SGA implantado, não ocorrerão emissões acrescidas decorrentes da atividade de co-processamento de resíduos industriais perigosos.

Igualmente, foram feitos experimentos utilizando alguns equipamentos do processo de fabricação de cimento para identificar se ocorrem emissões acrescidas dos poluentes citados acima com o co-processamento de resíduo.

Pela forma de abordagem do problema pode-se classificar a pesquisa como quali-quantitativa porque há um interesse no conhecimento do processo, portanto, o estudo é conduzido próximo ao fenômeno estudado, permitindo uma postura mais dinâmica do pesquisador frente à investigação. Pesquisas em literaturas nacionais e internacionais foram utilizadas como forma de identificar as melhores práticas adotadas no assunto. Experimentos foram realizados como forma de verificar interferências nas emissões com o co-processamento de resíduo.

Portanto, de acordo com as características acima citadas, conclui-se que o estudo em questão busca se identificar na empresa fatores críticos de sucessos

para operacionalizar a prevenção da poluição, no contexto de um SGA, como melhoria contínua, tornando o estudo de caso explícito e capaz de responder às questões problema.

3.2. DELINEAMENTO DA PESQUISA

Para alcançar o objetivo do presente estudo são citadas adiante, as diretrizes empregadas para sua elaboração:

Primeiramente no estágio atual do conhecimento sobre a atividade de co-processamento onde atuo há 5 anos como coordenador de Saúde , Segurança e Meio Ambiente(SSMA) , em uma unidade de um grande grupo cimenteiro do Brasil. As experiências adquiridas serviram como base para reunir dados que irão contribuir para enriquecer o trabalho e o meu desenvolvimento profissional.

Também como gestor e auditor de um Sistema Integrado de Saúde, Segurança e Meio Ambiente da mesma empresa, onde experiências adquiridas contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

Em segundo lugar, nas referências técnicas e teóricas sobre o assunto, nacionais e internacionais, em bibliografias que contemplam artigos técnicos, livros, trabalhos institucionais, normas, sites, dissertações de mestrados e ainda em procedimentos já elaborados pelas indústrias para gestão de resíduos.

Em terceiro lugar, nas informações obtidas durante o curso do Mestrado de Sistema de Gestão, tanto com os professores durante as aulas bem como com os colegas de classe nos trabalhos em grupos.

Em quarto e último serão consideradas as participações em seminários, congressos e reuniões técnicas a respeito de tema da dissertação.

3.3. INSTRUMENTO DE PESQUISA

Para obter os dados citados no subitem 3.1 (Metodológica), foi utilizado o seguinte instrumento de pesquisa:

- Dados da Indústria cimenteira onde atuo como coordenador se SSMA com propósito de obter informações que contribuíram na formulação de um banco dados sobre o tema pesquisado. Essa fase da pesquisa se caracterizou com interrogatório direto às pessoas e arquivos, acerca do problema estudado, com

intuito de se fazer uma análise qualitativa e foi possível chegar a algumas conclusões que ajudaram a obter respostas aos objetivos e às questões levantadas nesse trabalho.

- Também foram feitas perguntas sobre modelos de gestão praticados com foco na gestão de resíduos; procedimento de recebimento e queima de resíduos; relatórios de emissões atmosféricas; observações levantadas nas auditorias ambientais e melhorias contínuas realizadas na atividade de co-processamento durante os últimos 5 anos.

- Experimentos foram realizados utilizando o forno de clínquer para verificar o comportamento das concentrações dos poluentes em estudo quando o volume de resíduos foi variado. Nessa fase foi possível verificar se há evidências ou não de emissões atmosféricas acrescidas em decorrência do co-processamento de resíduo.

No final, espera-se que com o acervo de dados obtidos durante os processos citados acima, estudos comparativos possam ser realizados, utilizando tabelas, gráficos e outros meios, que respondam às questões propostas e atendam aos objetivos da pesquisa.

3.4. DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

Essa fase do trabalho fundamenta-se na investigação da atividade de co-processamento de resíduos industriais combustíveis em fornos de produção de clínquer da Fábrica de Cimento RJ, localizada no Estado do Rio de Janeiro. A mistura de resíduos é preparada pelas empresas denominadas de blendeiras e estão localizadas também no Estado do Rio, para substituição parcial dos combustíveis fósseis usados nos fornos industriais. Nesse método a fábrica co-processa entre 70 a 80 % dos resíduos totais. A diferença, ou seja, de 20 a 30% dos resíduos co-processados são recebidos diretamente dos geradores na formação *in natura* e sem a necessidade de mistura antes de serem queimados no forno.

Para atingir os objetivos propostos foram implementadas as etapas discriminadas a seguir:

- Coleta de informações e a recuperação de dados relativos ao desenvolvimento dessa atividade no que diz respeito a emissões atmosféricas e gestão de resíduos para co-processamento, no período de 2004 a 2007;
- Experimentos envolvendo as variáveis de processos e suas relações com os poluentes atmosféricos;
- Avaliação dos procedimentos atuais (ano base 2007) que compõe as gestões de resíduos para co-processamento;
- Entrevistas com técnicos envolvidos nas atividades de co-processamento da mistura de resíduos para obtenção de informações técnicas referentes aos processos produtivos das unidades mencionadas;
- Visitas de campo nos setores industriais envolvidas nas etapas de recebimento, armazenagem e nos pontos de injeção e queima nos fornos rotativos;
- Coleta de dados operacionais e detalhamento de informações referentes aos procedimentos de recebimento, armazenagem alimentação e controle da queima da mistura de resíduos nos fornos rotativos de clínquer;
- Recuperação de resultados obtidos em campanhas de amostragens em chaminés, durante a realização dos monitoramentos semestrais e das emissões remanescentes geradas durante o desenvolvimento da atividade de co-processamento através do monitoramento contínuo obtidos dos analisadores de gases instalados na chaminé do eletrofiltro do forno;
- Tabulação, análises e interpretação dos dados coletados e demais informações obtidas.

Simultaneamente foi desenvolvido amplo trabalho de pesquisa junto a bibliotecas técnicas, consultas a livros, artigos de periódicos, dissertações e teses, bem como pesquisa via Internet, principalmente, junto às Agências Ambientais Norte Americana e Européia e associações reconhecidamente técnicas ligadas ao setor cimenteiro.

CAPÍTULO 4 – ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE AS MUDANÇAS IMPLEMENTADAS NO PROCESSO

Em termos ambientais, as implicações do co-processamento estão principalmente relacionadas às emissões atmosféricas decorrentes das alterações na matéria prima e combustível e das adequações às novas condições implementadas no processo. As agências ambientais nacionais e internacionais têm como preocupações prioritárias as emissões atmosféricas as quais são submetidas a limites altamente restritivos, impostos pelas regulamentações. Mesmo assim muitos questionamentos têm sido feitos sobre a sustentabilidade ambiental quanto às emissões atmosféricas dos gases que saem pelas chaminés do forno. Em algumas regiões do país onde concentram indústrias de cimento, grupos formados pela comunidade local têm feito duras críticas as indústrias de cimento que operam com queima de resíduo.

Por outro lado, as indústrias de cimento vem há anos buscando a sustentabilidade de seus negócios e têm como estratégia a substituição de combustível por resíduos industriais com poder energético e estão se movimentando no sentido de obter uma resposta aos questionamentos da sociedade sobre a sustentabilidade da atividade de co-processamento.

Maringolo (2001) comenta que a crise mundial do petróleo entre 1979 e 1980 motivou o desenvolvimento tecnológico da indústria cimenteira nacional atendendo à convocação do governo federal visando à redução do consumo energético. O autor menciona ainda que a permanente necessidade de redução desses custos, aliada à pressão ambiental decorrente da crescente geração de resíduos industriais tem resultado na ampliação da atividade de co-processamento.

Portanto, considera-se oportuno neste cenário a proposta de se estudar as emissões atmosféricas dos gases que saem pelas chaminés dos fornos de clínquer que co-processam resíduos industriais e a forma de gerenciamento adotado para essa atividade, sendo essa a proposta da dissertação. No final, espera-se que trabalho proposto possa contribuir com as cimenteiras na obtenção à atingir dos seus objetivos estratégicos , principalmente na questão de substituição de combustível convencional por combustível sólido de substituição – CSS

(resíduos industriais), através de um modelo de gestão de resíduo que lhes dê subsídio para impedir a geração de emissões atmosféricas acrescidas em decorrências do co-processamento de resíduo. Além disso, que possa contemplar ao atendimento do seu principal objetivo que é a sustentabilidade dos seus negócios, garantindo, porém, a segurança da saúde pública e do meio ambiente.

4.2. ESTUDO DE CASO

4.2.1. A Empresa

A empresa em questão é uma holding controladora de empresas que atuam na produção de cimento, cal, argamassa e concreto. No Brasil, possui 22 fábricas além das unidades de concreto adquiridas no início de 2002.

Ocupa a liderança nacional de cimento e cal hidratada e industrial, e tem posição de destaque no setor de argamassa.

A localização das fábricas de Cimento está diretamente relacionada à localização da fonte de matéria-prima principal – o calcário – e à proximidade do mercado consumidor.

A Unidade em estudo é uma das fábricas localizadas no Estado do Rio de Janeiro, que será denominada no decorrer da dissertação de Fábrica de Cimento – RJ.

4.2.1.1. Fábrica de Cimento – RJ

Foi inaugurada em 1976 e tem capacidade produção de 70 mil toneladas/mês de cimento.

Possui 133 funcionários, distribuídos nos setores de: mineração, fabricação, manutenção, administração, novos projetos e expedição de cimento. Com exceção dos equipamentos de mineração, os equipamentos restantes da fábrica são automatizados.

A Fábrica de Cimento RJ é composta por duas linhas de produção, denominadas de LINHAS I (forno 01) e II (forno 02). A linha I entrou em operação em 1976 e a linha II em 1982. O forno 2 é o equipamento que está preparado para co-processamento de resíduo e será o foco do experimento.

4.2.1.1.1. Processo de fabricação de cimento

O processo de fabricação de cimento constitui das etapas de extração de matérias-primas, britagem de matérias-primas, moagem de farinha, Clinquerização, moagem de carvão/coque, manuseio de aditivos e insumos, moagem de cimento e expedição e co-processamento de resíduos e estão demonstrados através do fluxograma de processo da Fabrica de Cimento RJ no Anexo A.

As principais atividades do processo são:

- Extração de matérias-primas – Calcário e Argila.

O calcário é a matéria-prima básica na fabricação do cimento. O calcário é extraído segundo as etapas de sondagem, perfuração e detonação para fins de demolição das várias frentes de exploração. Os equipamentos utilizados nesta fase são as perfuratrizes, tratores e pás carregadeiras.

O calcário da jazida da Fábrica de Cimento RJ consiste em um minério bem cristalizado, o que indica um alto grau de metamorfismo. A formação do calcário consiste no processo onde houve a intrusão de uma rocha ígnea, conhecida como gnaiss, rica em sulfetos, o que ocasionou uma contaminação da rocha calcária com enxofre.

O calcário possui um alto teor de Carbonato de Cálcio, da ordem de 85% a 93%. Devido à contaminação com o Gnaiss, o lado leste da mina possui um teor de carbonato em torno de 75% de CaCO_3 . A direção do mergulho é subvertical, com ângulo de 15 a 20° no sentido leste, e possui uma zona de fraturas sub-horizontais espaçadas em 1,0 m.

Além do calcário, extrai-se também a argila de jazidas, localizadas dentro da área da empresa por meio de tratores e pás carregadeiras. As argilas são provenientes da decomposição das rochas ígneas e calcárias, extremamente abundantes na região, com os seguintes teores médios:

- SiO_2 : 62%
- Al_2O_3 : 20%
- Fe_2O_3 : 11%
- CaO : 0,58%
- SO_3 : 0,12%

Esta argila é utilizada no processo para correções químicas.

- Britagem de calcário e Argila

O calcário e a argila extraídos são transportados de suas jazidas até seus britadores específicos, por meio de caminhões fora de estrada.

Após a britagem, o calcário e a argila são encaminhados por meio de cintas transportadoras aos seus respectivos depósitos de estocagem para pré-homogenizados. Posteriormente são retomados e enviados para a etapa de moagem de farinha.

- Moagem de farinha

Nesta etapa, o calcário e a argila sofrem moagem conjunta em equipamentos denominados de moinhos de bolas, de forma a serem reduzidos a um tamanho de partícula adequado e necessário às reações químicas na etapa seguinte, denominada de Clinquerização.

Estes moinhos são dotados de uma antecâmara, para a prévia secagem das matérias-primas e duas câmaras de moagem.

A secagem se faz necessária, em virtude do processo de Clinquerização utilizado ser via seca.

O produto obtido nesta moagem passa a denominar-se farinha (mistura de calcário e argila finamente cominuída).

A farinha é transportada pneumaticamente para o elevador de canecas, seguindo para o separador estático específico do moinho. A fração grosseira retorna para o moinho e a fração fina constitui o produto sendo transportado pneumaticamente (tipo air-lift) para os silos de homogeneização.

Os gases empoeirados gerados pelos moinhos são exauridos passando-se por um sistema de filtragem através de ciclones em série com o filtro eletrostático. O "underflow" dos ciclones é descarregado e transportado pneumaticamente para a torre de condicionamento e o "overflow" é enviado para os filtros eletrostáticos. Os gases filtrados são exauridos para a atmosfera e o pó coletado é recolhido e, por transporte pneumático é enviado para o pré-aquecedor do forno.

- Clinquerização

Na etapa de Clinquerização, a farinha é retirada dos silos de estocagem. Posteriormente através do transporte pneumático do tipo air-lift a mistura é transferida para o pré-aquecedor da torre de ciclone. O pré-aquecedor é constituído por uma bateria de ciclones que opera em 4 quatro estágios.

A farinha é alimentada no 1º estágio de ciclones a 50-60°C que em contracorrente com os gases provenientes da combustão no interior do forno atinge 900-1000°C ao terminar o 4º estágio na câmara de fumaça. Os gases de combustão entram na câmara de fumaça a 1000-1100°C e saem para a torre de pré-aquecimento (após troca térmica com a farinha) a 380-400°C, para posterior resfriamento na torre de condicionamento de gases antes de serem enviados para o filtro eletrostático do forno de clínquer.

O sistema de dosagem de mistura crua é composto por um silo que se encontra apoiado em célula de carga, que faz o controle da extração da mistura crua do silo.

A farinha após o pré-aquecimento na torre de ciclones (descarbonatação) é introduzida no forno onde ocorre a clinquerização à temperatura de 1400-1500°C.

A energia necessária para estas reações químicas é obtida com a queima de combustíveis no equipamento denominado maçarico (Figura 19).

Utiliza-se coque de petróleo como combustíveis convencionais.

O maçarico gerador de combustão é alimentado com combustíveis convencional – coque e combustível sólido de substituição – CSS (resíduos líquidos e sólidos). O combustível sólido coque passa pela etapa de moagem.

Os CSS com pci (poder calorífico inferior) e o combustível coque são injetados diretos no forno pelo maçarico principal.

Ao final das reações, a farinha passa a ser denominada clínquer.

O clínquer produzido é resfriado e descarregado num britador de martelos e, após sua britagem é enviado por transportador de caçambas e deste, para as cadeias arrastadoras que alimentam os silos de clínquer.

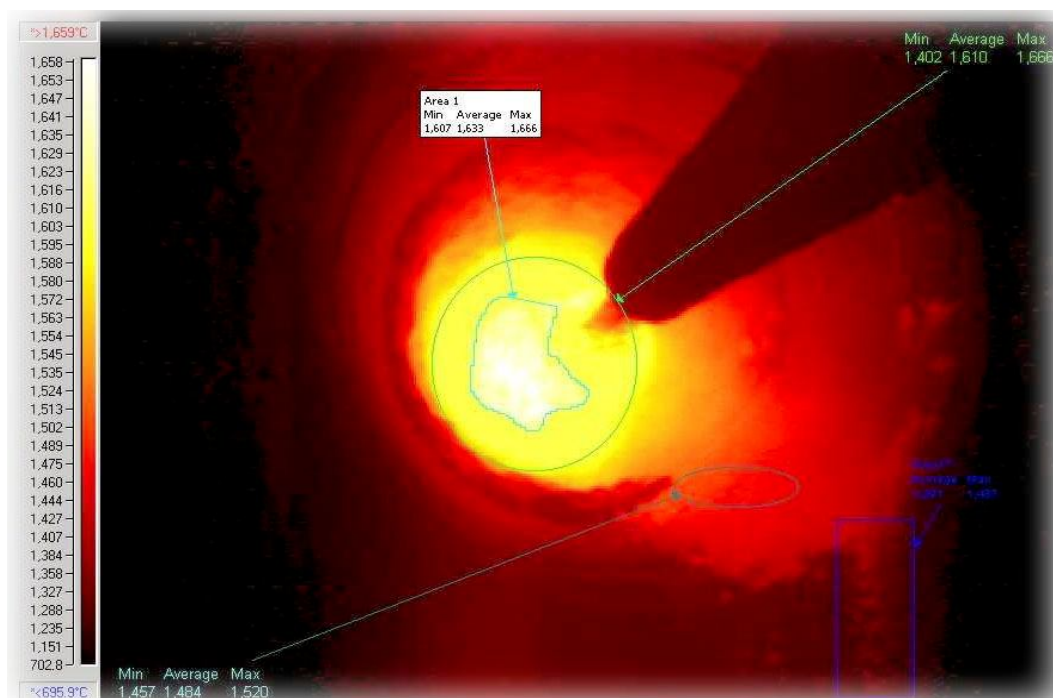


Figura 19 – Maçarico principal do forno de clínquer
Fonte: Indústria Cimenteira.

- Moagem de coque de petróleo

O combustível utilizado no forno é coque de petróleo. Devido às necessidades do forno, o coque recebido é submetido às operações de secagem e moagem.

O combustível sólido coque é retomado pela pá-carregadeira que alimenta as tremonhas/moegas. A descarga das moegas é retirada através de uma balança dosadora, sendo enviadas por meio de correias até os dois silos dosadores de alimentação do moinho de coque.

O moinho possui duas câmaras, sendo que a 1ª câmara é constituída de um secador e a 2ª câmara da moagem do coque.

O coque retomado é transportado pneumaticamente para o silo de coque moído cuja capacidade é de 50 m³.

A secagem do coque é realizada através da retirada do coque do moinho utilizando-se o gás quente do resfriador de clínquer ou através do gerador de gás quente.

- Manuseio de aditivos e insumos

Na fabricação de cimento, utiliza-se na mistura com o clínquer os produtos: escória de siderúrgica, gesso e calcário.

A escória moída é depositada em silos e retomadas por correias transportadoras para alimentação do moinho de cimento.

Todo gesso é estocado em pilhas em um galpão coberto, retomado por carregadeiras e alimentado na instalação de britagem. O gesso britado é transportado por correia até a área de homogeneização.

O calcário britado é depositado no pátio e retomado por pás carregadeiras que abastece a moega de calcário e através de correias transportadoras para alimentação do moinho de cimento.

- Moagem de cimento

O clínquer juntamente com a escória siderúrgica, o gesso e o calcário, são moídos até alcançar uma finura preconizada pelas Normas Brasileiras e em conformidade com o tipo e a qualidade do cimento produzido.

Esta moagem é realizada em moinhos de bolas apropriados, dotados de duas câmaras de moagem.

Neste moinho, a primeira câmara de moagem tem como objetivo promover a moagem grosseira, e remover as umidades da escória siderúrgica, do gesso e do calcário, de forma a evitar reações hidráulicas com o clínquer, durante a moagem conjunta destes materiais.

- Ensacamento e expedição de cimento

Após a moagem, o cimento é transportado para os silos de armazenagem e através de um sistema fluidizado para o transportador que transfere o cimento para um elevador, e deste para o silo do ensacamento sendo posteriormente expedidos nas modalidades de ensacado e granel.

- Atividade de co-processamento de resíduo

A Fábrica de Cimento RJ está preparada e licenciada para receber blend de resíduo diretamente de empresa denominadas de blendeiras ou resíduos *in natura* direto do gerador de resíduo sem a necessidade de realizar a mistura.

A atividade de co-processamento de resíduos na Fábrica de Cimento RJ é dividida em quadro etapas distintas: recebimento, estocagem, injeção e destruição dos resíduos e monitoramento das emissões.

Para cada etapa citada acima não foi evidenciado procedimentos formais que caracteriza a gestão dessa atividade.

Na página 132 faz-se uma proposição de um sistema de gestão de resíduo co-processado em uma fábrica de cimento como uma maneira de sistematizar essa atividade e com isso minimizar os impactos ambientais decorrentes das emissões atmosféricas.

4.2.1.1.2. Fontes de emissão

- Emissões atmosféricas

Na Fábrica de Cimento RJ as emissões atmosféricas se caracterizam basicamente por emissão de material particulado a partir das operações de manuseio e movimentação de materiais em transferências entre equipamentos não estanques, transporte das matérias-primas, insumos e produtos nas vias de acesso dentro da empresa e, também, por emissão de material particulado e gasoso a partir das chaminés dos fornos de clinquerização, resfriador de clínquer, moinho CKP (Chichibu-Kawasaki Preginder), moinho de cru, moinhos de cimento e de combustíveis (moinha de carvão/coque), ensacamentos, além de diversas exaustões de filtros de mangas de despoeiramento de silos, equipamentos e áreas de trabalho.

As operações de transporte e manuseio entre equipamentos não estanques fixos e as chaminés dos filtros de mangas de silos e áreas de trabalho representam emissões locais e de pequeno alcance, ao passo que as emissões das chaminés dos fornos e dos moinhos, embora sejam previamente filtradas e lançadas dentro dos limites legais estabelecidos, agregadas à intensa movimentação de carga nas vias da empresa, provocam o lançamento de partículas além da área da fábrica.

Neste aspecto, as fontes de emissões atmosféricas na Fábrica de Cimento RJ são subdivididas em: fontes fixas principais e secundárias, e fontes de poeiras fugitivas.

As fontes fixas principais são características das chaminés existentes: filtros eletrostáticos (eletrofiltro) do forno 1 e 2 de clínquer, moinhos e resfriador de grelhas, ensacadeiras e caldeiras.

As fontes fixas secundárias são constituídas pelos sistemas de desempoeiramento através de filtros de mangas existentes ao longo de todo o processo produtivo: moinhos, britadores, ensacamento, silos, torres de carvão e homogeneização.

As fontes de poeira fugitiva são características das seguintes áreas: depósito de matérias-primas: calcário; moinha de carvão; coque de petróleo, gesso, escória, carepa e sienito; pátio de estocagem de calcário bruto; pátio de matérias-primas: gesso, escória, calcário; vias de acesso dos prédios das ensacadeiras; depósito de calcário; depósito de argila; estacionamento das carretas.

O presente trabalho desenvolveu um estudo dos dados provenientes de relatórios de medições das emissões de material particulado e gases (NO_x , SO_2 , CO e THC) gerados pela fonte fixa principal na chaminé do eletrofiltro do forno 2 que co-processa combustíveis sólidos de substituição –CSS(resíduos industriais)cuja as emissões atmosféricas estão especificamente estabelecidas por lei para essa atividade.

4.2.1.1.3. Sistema de Gestão Ambiental

Como forma de avaliar o sistema de gestão ambiental da fábrica de cimento RJ, foram analisados os relatórios das auditorias ambientais realizadas no período de 2003 a 2007.

No capítulo 2, Auditorias Ambientais classifica em diferentes tipos as auditorias ambientais, destas 3 foram utilizadas na Fábrica de Cimento RJ para avaliar o SGA:

- a) Auditoria de Conformidade Legal (“Legal Compliance Assessment”) –
Atendendo a Lei Estadual 1898 de 26/11/1991 – Dispõe sobre a realização de Auditorias Ambientais no Estado do Rio de Janeiro através da DZ 056 R.2 – Diretriz para realização de Auditoria Ambiental.

- b) Auditoria de Certificação – Atendendo requisitos da ISO 14001.
- c) Auditoria de Terceira Parte ou Auditoria Independente – Atendendo requisitos acordados entre as partes envolvendo a atividade de co-processamento de resíduo.
- d) Auditoria Interna – Atendendo uma solicitação da empresa para verificar o SGA com base nos procedimentos internos.

4.2.1.1.3.1. Análise dos Relatórios de Auditoria Ambiental

⇒ As Auditorias de terceira parte e o Co-processamento

A Fábrica de Cimento RJ é uma empresa que co-processa resíduo no forno de clínquer.

As Auditorias Ambientais, neste contexto, são realizadas pelos técnicos das empresas fornecedoras dos resíduos ou contratadas por estas, para verificar a adequação ambiental da Fábrica de Cimento RJ através da análise dos Planos de Ação dos Relatórios de Auditoria Ambiental apresentados.

Um dos fornecedores de resíduos é a Petrobrás a qual contratou uma empresa de consultoria para realização de auditoria ambiental nas instalações de co-processamento da fábrica de Cimento - RJ.

A auditoria ocorreu em março de 2003 e foram identificadas 08 não conformidades de caráter ambiental.

Em outubro de 2003 a Petrobrás reenviou à empresa de consultoria acima mencionada para auditoria de verificação do plano de ação e constatou que todas as oito não conformidades foram resolvidas, demonstrando a importância das auditorias para eficácia do Sistema de Gestão Ambiental.

Das oito não conformidades levantadas na auditoria, citamos abaixo cinco, com respectivos comentários do auditor e disposição da empresa:

- a) Verificou-se a possibilidade de transferência de resíduos para fora da área contida do galpão de estoque de resíduo, através dos pneus dos caminhões, pá carregadeira e empilhadeira.

Recomendação: Implantar um dispositivo do tipo “lava rodas”, com coleta e disposição adequada da água de lavagem.

Ação Corretiva: Foi implantado dispositivo lava rodas e ETE para captação das águas geradas nesse local.

- b) Verificou-se que o sistema de contenção do galpão de resíduos não é adequado para conter a água de uma chuva intensa e de ventos, introduzida pelas aberturas das fachadas frontais do galpão.

Recomendação: Reduzir ou eliminar as aberturas das fachadas.

Ação Corretiva: Foi realizado o fechamento lateral e frontal do galpão.

- c) Não foi evidenciada a realização das medições de ruído, conforme Resolução CONAMA 001/90.

Recomendação: Evidenciar atendimento a Restrição nº. 05 da licença de operação (LO).

Ação Corretiva: Foram realizadas as medições de ruídos conforme previsto em lei.

- d) Vários pontos de acúmulo de água foram constatados, propiciando a proliferação do mosquito *Aedes Aegypti*, localizados na rede de drenagem do galpão de resíduos.

Recomendação: Implementar rotina de limpeza e manutenção da rede de drenagem.

Ação Corretiva: Aberta Ordem de Serviço no plano de manutenção e sistematização dessa ação.

- e) Constatou-se que a bacia de contenção do reservatório de água da lavanderia encontrava-se sub-dimensionada.

Recomendação: Rever o dimensionamento da bacia de contenção.

Ação Corretiva: Foi executada obra de redimensionamento do reservatório.

⇒ Auditoria Interna

A Fábrica de Cimento - RJ possui um Sistema integrado de Saúde Segurança e Meio Ambiente – SISSMA e com base nos requisitos ambientais desse

sistema foi realizada em 2004 por auditores interno uma auditoria para verificar o SGA antes início dos preparativos para auditoria de certificação ISO 14001.

Abaixo são citadas algumas observações dos auditores:

- Monitoramento ambiental – Apesar de ser uma exigência legal, os desvios levantados nas medições eram de forma pontual e não sistêmica. Não foram evidenciados procedimentos para tratar desvios encontrados nos monitoramentos contínuos.
- Gerenciamento de Resíduos – Foi intensificado o controle dos resíduos gerados, tanto em quantidade quanto nas disposições. No entanto, o mesmo não ocorreu para resíduos co-processados.
- Conservação de recursos – Passou-se a controlar o consumo de água e foram estabelecidos objetivos e metas de redução atendendo ao requisito do sistema.
- Conscientização e promoção – Palestras para os funcionários próprios, terceiros e comunidade sobre temas voltados ao meio ambiente tornou-se uma prática anual. Participação de eventos promovidos pelo órgão ambiental (FEEMA) e municipal, também têm sido uma prática adotada.
- Requerimentos e/ou padrões legais – Contratou-se uma empresa de consultoria com especialização em legislação ambiental para dar suporte à Unidade e evitar desvios nessa área.
- Objetivos e metas – Foram definidos objetivos e metas, para atender tanto o sistema como a necessidade da empresa.

⇒ Auditorias de Certificação

As Auditorias Ambientais de certificação realizadas em 2005, 2006 e 2007 foram feitas pela empresa certificadora – ISO 14001 cujas não conformidades levantadas e suas respectivas disposições realizadas pela fábrica estão relacionadas abaixo:

2005

- a) Não Conformidade :Garantir a melhoria do controle das emissões gasosas provenientes das capelas do laboratório de análise de matérias primas.

Ação corretiva: Foi elaborado procedimento e reformada a capela do laboratório da unidade.

- b) Não Conformidade :Garantir a melhoria no controle dos aspectos ambientais do restaurante.

Ação corretiva: Foi elaborado procedimento operacional para disposição correta dos resíduos do restaurante.

- c) Não Conformidade:Garantir o acompanhamento adequado do atendimento legal das empresas prestadoras de serviço que atuam na organização.

Ação corretiva: Elaboramos sistemática de controle com prazo de validade das licenças.

2006

- a) Não Conformidade: Os controles operacionais relacionados aos aspectos ambientais identificadas em atividades terceirizadas, realizadas dentro da organização, podem ser aperfeiçoadas.

Ação corretiva: Implementamos check-list para os veículos de empresas terceirizadas que trabalham dentro da unidade.

- b) Não Conformidade:O controle dos canais de escoamento de águas pluviais pode ser melhorado.

Ação corretiva: Realizamos limpeza sistemática do sistema de escoamento.

- e) Não Conformidade: O controle preventivo da contaminação do solo na área do posto de abastecimento de combustível pode ser melhorado.

Ação corretiva: Realizamos limpezas periódicas na área do posto de abastecimento.

2007

- a) Não Conformidade: Não evidenciada calibração de instrumentos utilizados para medição.

Ação corretiva: Implementamos sistema de recebimento de relatório de medições ambientais realizadas por terceiros apenas com certificados de calibração.

- b) Não Conformidade: Alguns registros de inspeções quinzenais do Separador Água/Óleo não estavam disponíveis.

Ação corretiva: Realizamos quinzenalmente inspeções no separador água e óleo.

- c) Não Conformidade: Em dois locais não foram encontrados extintores de incêndio.

Ação corretiva: Foram instalados extintores nos locais citados acima e realizamos uma reunião com a empresa prestadora de serviço sobre o desvio encontrado.

⇒ Auditorias de Conformidade Legal

Foram analisados os relatórios das auditorias de Conformidade Legal no período de 2004 a 2007, cujas não conformidades levantadas e suas respectivas disposições realizadas pela fábrica estão resumidas abaixo:

- a) Não Conformidade - Proteção e isolamento da lagoa de decantação, evitando-se a possibilidade de acesso às margens.

Nota: Trata-se do retorno das águas da Estação de Tratamento de Águas Industriais – ETA que fica em um terreno da fábrica próximo à comunidade.

Ação Corretiva: Foi cercado o terreno e colocado um portão.

- b) Não Conformidade- Instalação de filtros anaeróbicos às fossas sépticas existentes.

Ação Corretiva: Está aprovado projeto de instalação de uma Estação Tratamento de Esgoto.

- c) Não Conformidade- Reavaliação das cargas de resíduos a serem queimados no forno. Alguns resultados do Programa de Controle do Ar – PROCON-AR, estabelecido pela FEEMA, apresentaram resultados fora dos limites de tolerância.

Ação corretiva: Foram feitas novas cargas e os resultados seguintes do PROCON-AR ficaram dentro do limite de tolerância.

- d) Não Conformidade -Construção de canaletas de drenagem no galpão de resíduos.

Ação Corretiva: Além das canaletas foi construída uma ETE – efluentes de águas pluviais.

- e) Não Conformidade:Foi evidenciada a existência de chorume e restos de comida no piso, próximo a rede de água pluvial.

Ação corretiva: Foi colocado sistema de contenção e cobertura na área de armazenamento de lixo.

f) Não Conformidade: Não foi evidenciada a presença do projeto da Estação de Tratamento de Efluentes.

Ação corretiva: Foi elaborado projeto da ETE Sanitária.

g) Não Conformidade: Foi evidenciado o armazenamento de resíduos sem identificação (local: Box 1 – Óleo de transformadores e Box 3 – Box de Resíduos).

Ação corretiva: Os resíduos foram identificados.

h) Não Conformidade :Foi evidenciado, no almoxarifado, o armazenamento de tambores de graxa e bombonas de óleo sobre o ralo de águas pluviais.

Ação corretiva: Os tambores foram colocados em local coberto e com contenção.

i) Não Conformidade:Não foi evidenciada a existência de procedimento para evitar a proliferação de mosquitos.

Ação corretiva: Foi elaborado o procedimento.

j) Não Conformidade:Foi evidenciado que o dreno no local de abastecimento de resíduo líquido estava aberto e a contenção no local quebrada.

Ação corretiva: O dreno foi reparado e colocado na posição fechado.

l) Não Conformidade:Foi evidenciado que alguns manifestos de resíduos estavam preenchidos de maneira incorreta, por exemplo, manifestos com a mesma numeração para resíduos diferentes.

Ação corretiva: Foi revisada toda a numeração dos manifestos

⇒ **Análise dos Relatórios de Auditoria Ambiental**

A partir das análises dos relatórios de auditorias citados acima, foi possível observar que houve um significativo avanço nas questões ambientais em função da implantação de um Sistema de Gestão Ambiental – SGA pela empresa.

Investimentos significativos foram realizados no período amostrado, principalmente em equipamentos de controle da poluição com instalações de filtros e estações de efluentes líquidos. No entanto, é possível observar que na atividade de co-processamento, os controles de entrada, queima e monitoramento de resíduos não estão implementados, significando que o SGA não teve grande contribuição para gestão de resíduos co-processados. De todas as não conformidades de caráter ambiental levantadas pela auditoria nota-se que nenhuma faz recomendações sobre

a necessidade de um procedimento para gerenciamento de resíduos co-processados.

4.2.1.1.4. Desenvolvimento Sustentável e o co-processamento

Em agosto de 2007 por uma iniciativa das indústrias de cimento da região centro norte fluminense do RJ, da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e do Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento (SNIC), ocorreu a 1ª Feira de Desenvolvimento Sustentável (FDS) da Região Centro – Norte Fluminense, cujo objetivo foi :

- Estimular o debate e a conscientização de aspectos relativos ao desenvolvimento sustentável da região, envolvendo temas como educação ambiental, a preservação dos recursos ambientais e o estímulo ao desenvolvimento econômico e social dos Municípios.
- Promover a divulgação no âmbito regional e estadual de projetos e bons exemplos de desenvolvimento sustentável utilizado pelas empresas, governo, ONGs e comunidade

Nesse sentido, a Feira de Desenvolvimento Sustentável desenvolveu uma série de atividades, que reuniram tanto a comunidade local como as autoridades municipais, estaduais e federais, além de outras lideranças políticas, comunitárias e empresariais da região, voltadas, em especial, aos seguintes objetivos principais:

- a) conscientizar os participantes sobre a necessidade de se promover o desenvolvimento sustentável da região, o que demandará a adoção de ações tanto na área econômica, como social, ambiental, urbanística e institucional;
- b) estimular uma reflexão conjunta sobre temas de interesse comum aos Municípios inseridos no pólo cimenteiro da região, de forma a que se promova uma atuação conjunta desses Municípios visando ao desenvolvimento regional;
- c) debater formas inovadoras de planejamento e gestão municipal e regional, apontando para o novo quadro normativo em vigor no país, que estimula a prática do planejamento participativo, através da elaboração de Planos Diretores Municipais, além da instituição de consórcios municipais;

d) estabelecer uma agenda de projetos de interesse comuns à região, com base em suas potencialidades, de forma a possibilitar um diálogo com os agentes decisórios, assim como com os responsáveis pelo financiamento de projetos.

4.2.1.1.4.1 Resultados da FDS

O evento teve impacto positivo na comunidade. Esta foi a primeira vez que os municípios da região centro norte fluminense receberam autoridades federais e estaduais dispostas a debaterem e apoiarem alternativas para o crescimento econômico regional. Além disso, começam a surgir resultados concretos a partir das propostas apresentadas.

Exemplo foi a iniciativa na área de habitação popular para um dos municípios, com o apoio do Governo Federal, fruto da presença de altos representantes do Ministério das Cidades.

Outro ponto alto do evento foi a iniciativa dos três municípios realizarem consórcio para tratamento do lixo urbano e posterior eliminação ambientalmente correta nos fornos das indústrias de cimento local.

Nessa etapa do trabalho inicia-se os experimentos 1 a 5 com as emissões atmosféricas dos poluentes MP, THC, CO, SO₂ e NO_x e em seguida no parágrafo 4.2.5, página 160, faz-se a proposta de um sistema de gestão para atividade de co-processamento.

Os experimentos foram realizados tanto na fábrica de cimento em estudo como em outras unidades de cimento do mesmo grupo cimenteiro com propósito de atender a um dos objetivos desse trabalho que é: “Demonstrar que há possibilidade de não se ter emissões acrescidas dos poluentes NO_x, SO₂, CO, THC e MP decorrentes da inclusão da atividade de co-processamento de resíduos industriais perigosos no processo de fabricação de cimento”.

4.2.2 Emissões atmosféricas – teste com MP

Experimento 1

Os resultados referentes aos poluentes MP foram obtidos a partir de teste realizado na fábrica de cimento RJ.

Para cumprir essa fase da pesquisa utilizei a experiência dos operadores que fazem a operação do forno por um sistema automatizado no painel central da fábrica de cimento RJ onde utilizam monitores e teclados de computador para monitorar e controlar todas as variáveis de processo do sistema forno.

Utilizando um dos monitores e teclado durante três dias alternados foi realizado três testes para verificar a influencia do volume de resíduo co-processado em t/h com as emissões do poluente material particulado – MP.

O objetivo dos testes foi observar qual seria o comportamento das variáveis de processo: quantidade de resíduos co-processados e o poluente material particulado – MP, ambos em ton/h, quando aumentasse a temperatura de entrada do eletrofiltro em valores superiores ao normal de operação do filtro, ou seja, acima de 110°C, mantendo constante a produção do forno.

Importante destacar que no momento do teste os resíduos co-processados foram injetados no forno pelo maçarico principal e na 4ª etapa da torre de ciclone, início da zona de calcinação. Portanto durante o teste não estava sendo co-processado resíduo injetado via matéria prima. (figura 35 da página 168 mostra os pontos de injeção de resíduo).

No forno 2 (linha 2) da fábrica de cimento RJ a temperatura dos gases de combustão na entrada do filtro elétrico deve permanecer na faixa entre 100 a 110°C para que as emissões dos poluentes material particulado-MP fique abaixo do limite de tolerância estabelecidos pela legislação: 50mg/Nm³.

A Figura 20 mostra a tela utilizada durante o teste com destaque na temperatura de entrada do filtro e concentrações dos poluentes em estudo

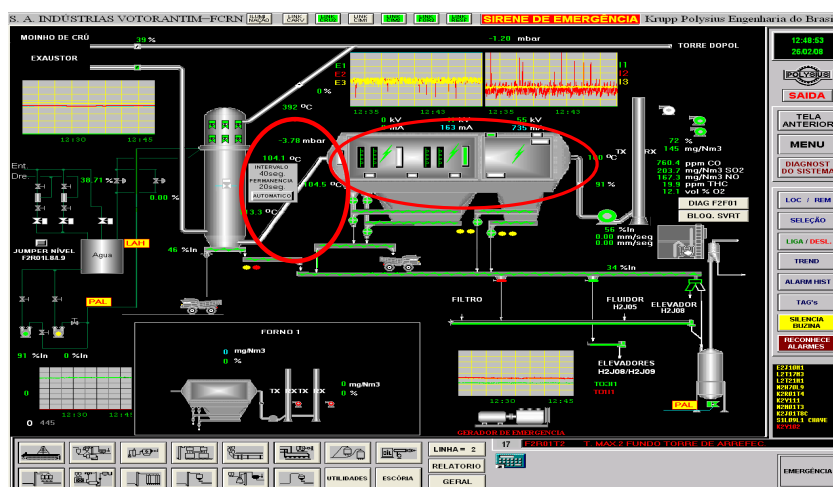


Figura 20 – Tela computador do painel central da fábrica de cimento RJ com destaque para filtro elétrico e temperatura entrada do filtro: Fonte: Fábrica de cimento RJ, adaptada pelo autor.

Para aumentar a temperatura de entrada do filtro e permitir que os testes fossem realizados foi necessário reduzir a vazão de água de refrigeração dos gases de combustão do forno fazendo com que a temperatura dos gases na entrada do filtro se elevassem em decorrência da redução da troca de calor com menor volume de água injetado na torre de arrefecimento.

Primeira parte do teste constou em registrar os valores das quatro variáveis de processo com o filtro elétrico funcionando na condição normal de operação e o forno também em operação normal e co-processando resíduo. Nessa situação os resultados foram os seguintes: co-processamento de resíduo – 2,8 ton/h; temperatura de entrada do filtro – 106°C; produção do forno – 101 ton/h e emissões de material particulado – 25 mg/Nm³.

Em seguida foram feitos três testes variando somente o volume de resíduo co-processamento e a temperatura de entrada do filtro, fixando a produção do forno e observando as variações nos valores das emissões de particulados. Cada teste teve duração de três horas, que foram suficientes para obter os resultados esperados:

Teste 1 – foram fixados o volume de resíduo em 2,8 ton/h e a produção do forno em 101 ton/h. Gradualmente foi aumentado a temperatura de 25°C(normal) para 125 °C . Nesse momento a valor do poluente MP registrou 66 mg/Nm³. Em seguida aumentou-se a temperatura para 140°C e poluente MP registrou 122mg/Nm³ e finalmente elevou-se a temperatura para 150°C e poluente MP registrou 150mg/Nm³.

Teste 2 e 3 – alteração realizada em relação ao teste 1 foi com o volume de resíduo, fixados em 1,0 ton/h e 0,0 ton/h respectivamente. O procedimento do aumento da temperatura e os resultados dos poluentes MP foram iguais aos do teste1.

O gráfico da figura 21 mostra um resumo dos resultados obtidos com os testes citado acima

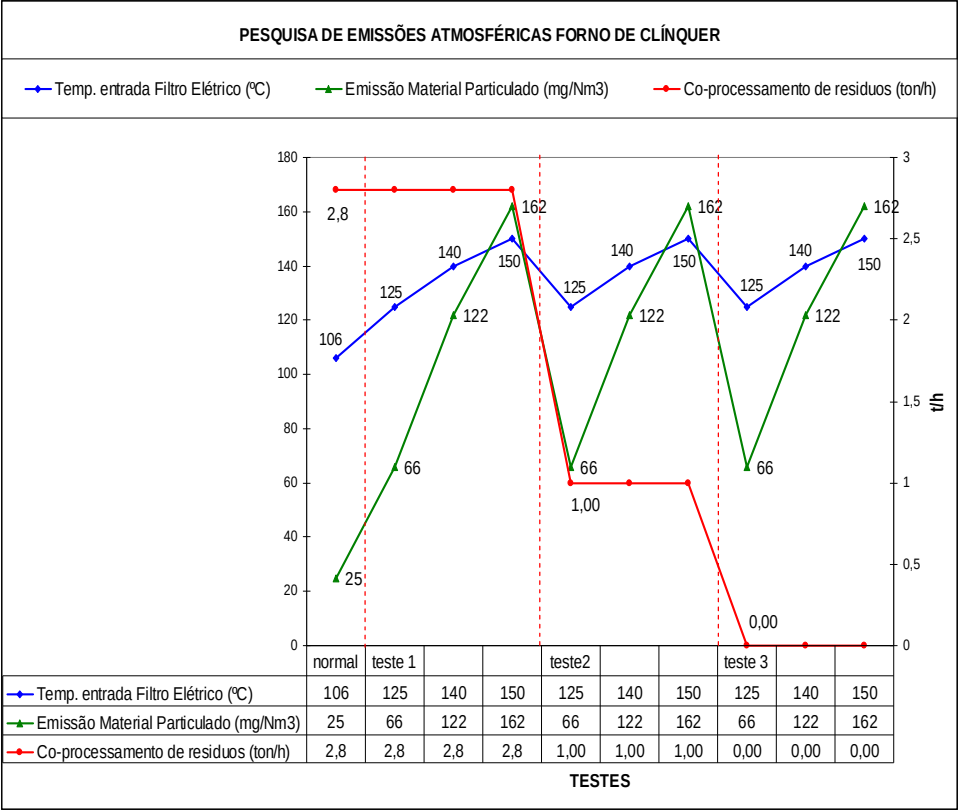


Figura 21 – Gráfico com resultado do teste com MP; Fonte: própria do autor.

4.2.1. Análise dos resultados

Da análise dos resultados das emissões atmosféricas encontradas durante os testes no forno 2 da fábrica de cimento RJ, dois pontos se destacam:

1) O aumento nas emissões de MP em forno de clínquer tem uma relação direta com a temperatura dos gases de entrada no filtro elétrico, podendo ser uma das principais variáveis de processo de fabricação de clínquer que contribui para emissões acrescida desse poluente. No gráfico da figura 21 é possível evidenciar essa relação, pois nos três teste as emissões de MP tiveram seus valores de concentração acrescidos quando as temperaturas de entrada dos gases foram também aumentadas.

2) Em se tratando de emissões de MP, o co-processamento de resíduo não influencia nas emissões acrescida desse poluente quando o resíduo é injetado no forno pelo maçarico e na torre de ciclone. No gráfico da figura 21 é possível

evidenciar essa relação, pois nos três testes o volume de resíduo em t/h tiveram seus valores reduzidos chegando até a zerar e as emissões de MP não tiveram alterações em decorrência das variações dos volumes de resíduo co-processado.

4.2.3 Emissões atmosféricas – teste com poluentes – THC e MP

Experimento 2

Os resultados referentes aos poluentes THC e MP foram obtidos a partir de teste realizado na fábrica de cimento RJ.

Para realizar esse teste foi utilizado resíduo fornecido direto do gerador constituído de uma terra contaminada com óleos e graxas provenientes de postos de gasolina.

Segundo suas características físicas e químicas o resíduo foi classificado como de substituição de matéria prima e, portanto injetado pelo depósito de matéria prima argila.

O teste constou em verificar qual seria o comportamento das emissões atmosférica em se tratando de material particulado – MP e hidrocarbonetos totais – THC quando o resíduo terra contaminada fosse co-processado com um percentual de resíduo na farinha de 1,90%.

Nos relatórios da fábrica de cimento RJ o resíduo terra contaminada quando co-processado com participação de 0,95% na farinha não apresentou emissões atmosféricas de MP e THC acima dos limites estabelecidos pela legislação.

Também foi realizado teste para verificar qual seria o comportamento das emissões dos poluentes MP e THC quando o resíduo terra contaminada fosse totalmente retirado da composição da farinha.

O resíduo terra contaminada foi co-processado via matéria prima – argila e moído juntamente com a mistura calcário e argila pelo moinho de farinha. A farinha produzida com essa mistura (calcário + argila + resíduo) foi armazenada em silo antes de entrar no forno.

No momento que a farinha entrou no forno, observou-se um aumento gradual dos valores do poluente MP e THC. Material particulado – MP passou de 40mg/Nm³ para 100mg/Nm³, em seguida para 150mg/Nm³ e atingindo o valor final

de $250\text{mg}/\text{Nm}^3$. Com esse valor foi possível observar a carga poluidora na saída da chaminé. O limite legal para o MP é de no máximo $50\text{mg}/\text{Nm}^3$.

Hidrocarbonetos totais – THC passou de 10 ppm para 20 ppm até chegar a 35 ppm. O limite legal para THC é de no máximo 20 ppm.

Em seguida, a farinha com terra contaminada deixou de ser consumida e foi substituída por outra sem resíduo. Gradualmente, os teores correspondentes ao MP e THC foram reduzindo até chegar a valores aceitáveis, ou seja, inferiores a $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ e 20 ppm respectivamente. Essa fase do teste durou aproximadamente 8 horas.

As figuras 22 e 23 resumem os momentos dos testes citados nos textos acima.

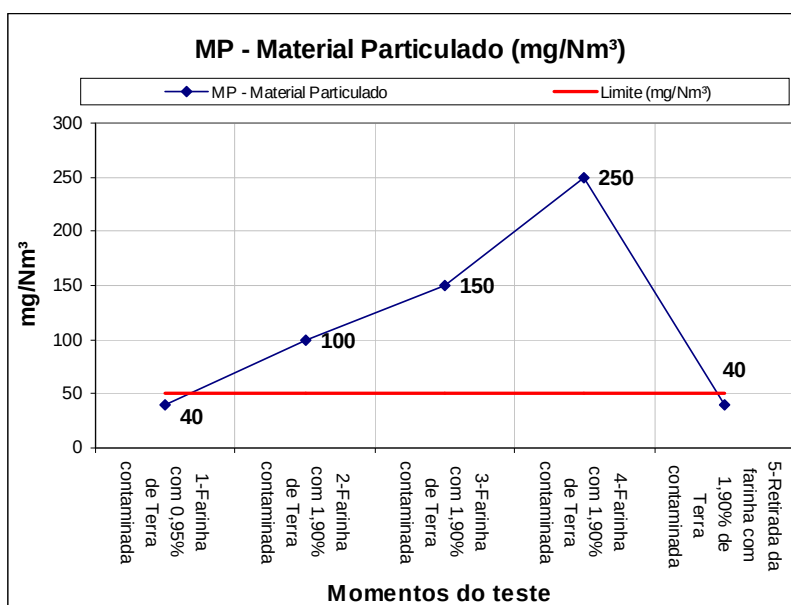


Figura 22 – Variação do MP versus percentual de resíduo na farinha – Fonte: própria do autor.

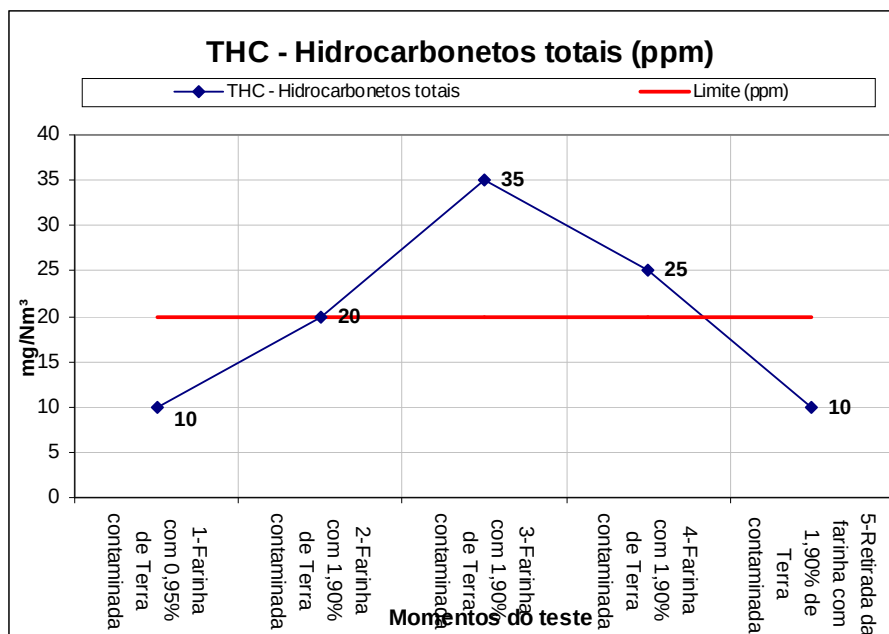


Figura 23 – variação do THC versus percentual de resíduo na farinha – Fonte: própria do autor.

4.2.1. Análise dos resultados

No término dos testes foram avaliados os motivos que levaram ao acréscimo das emissões em decorrência do co-processamento da terra contaminada, o que sugere o seguinte:

Como citado no parágrafo na página 88, os filtros eletrostáticos retêm partículas sólidas quando uma alta tensão, gerada por um transformador retificador, é aplicada a placas criando um campo magnético. Este campo é capaz de polarizar partículas que são colocadas entre as placas, desde que a constante dielétrica do meio seja suficiente para isto.

Os íons negativos atraem e aderem o pó às placas e os positivos aderem o pó em menor proporção aos eletrodos. Mecanicamente, através de martelos batedores, o pó é desprendido das placas e retorna ao processo.

O resíduo terra contaminada utilizado para teste contem em sua composição concentração de hidrocarbonetos provenientes da contaminação do solo de postos de combustíveis por óleos lubrificantes, óleo diesel e gasolina. Por sua vez, os hidrocarbonetos são conhecidos como substâncias apolares ou que apresentam baixa polaridade e que em ambiente de baixo teor de oxigênio podem apresentar uma queima incompleta. Este fato é observado pela geração de uma

fuligem preta, rica em carbono. Sabe-se que o carbono é um bom condutor e que por isso tem a capacidade de reduzir a constante dielétrica de um meio.

Portanto, uma explicação não conclusiva foi de que o volume da terra contaminada contida na farinha com grandes concentrações de hidrocarbonetos gerou uma quantidade de fuligem que fez com que ocorresse a queda da constante dielétrica dos gases no interior do filtro, impossibilitando a polarização do pó e fazendo com que grande parte deste, bem como do gás, passasse direto pelo filtro saindo pela chaminé e com isso aumentando as concentrações de MP e THC.

4.2.4 Emissões atmosféricas – teste com poluentes CO, NO_x e SO₂

Os resultados referentes ao poluente CO, NO_x e SO₂ foram obtidos a partir de teste realizado em duas fábricas de cimento do mesmo grupo cimenteiro aqui denominada de Indústria de Cimento A e Industria de Cimento B.

Procurou-se quando aplicável, obter informações que pudessem separar as evidencias em teóricas e práticas.

Foram consideradas evidências teóricas como sendo as obtidas a partir de artigos técnicos em sites, revistas, dissertações e literaturas específicas sobre processo fabricação de cimento.

As evidências práticas foram testes realizados nas indústrias de cimento citadas.

4.2.4.1. Teste com o Poluente monóxido de carbono CO

Experimento 3

4.2.4.1.1. Parecer teórico

Dellinger, Pershing e Sarofim (1993) citam que os níveis de emissão de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos totais (THC) são usados como parâmetros de monitoramento contínuo em fornos de clínquer que co-processam resíduos perigosos e que os mesmos têm sido proposto para monitorar as emissões desses fornos. Dellinger, Pershing e Sarofim (1993, 1999, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p.157).

No entanto, as emissões de CO são também fortemente relacionadas com as reações de oxidação da matéria orgânica existente na farinha (95% calcário +- 5% argila), especialmente em áreas do forno onde ocorrem níveis mais baixos de oxigênio e/ou temperaturas não muito elevadas. Nessas condições maximiza-se a possibilidade da ocorrência de oxidação incompleta dos compostos orgânicos voláteis das matérias-primas utilizadas na produção do clínquer (CEMBUREAU, 1999).

Araújo (2002) menciona que o monóxido de carbono é o principal produto da queima incompleta de combustíveis motivando, muitas vezes, o uso de sua concentração como instrumento de normatização por parte das agências de controle de poluição. O CONAMA 264/99, estabelece limites de emissão de CO para fornos de clínquer que co-processam resíduos em 100 ppm corrigido a 7% de O₂ (base seca) sendo que esse poderá ser excedido desde que os valores medidos de THC não excedam a 20 ppm, em termos de média horária, e que não seja ultrapassado o limite superior de CO de 500 ppm, corrigido a sete por cento de O₂ (base seca), em qualquer instante.

No entanto, a viabilidade de utilização desses parâmetros, CO e THC, como indicadores de boas condições de combustão em processos de produção de clínquer é muitas vezes questionada. Isso se deve à geração de CO também na etapa de calcinação do CaCO₃, cujos níveis podem superar aqueles provenientes da queima de combustíveis na maioria dos fornos rotativos de clínquer. É ainda referido que os níveis de THC gerados pelo aquecimento da farinha crua alimentada nesses sistemas podem também superar aqueles gerados no processo de combustão. CEMBUREAU, 1999.

Portanto pelo dispositivo os autores citam que a fonte de emissões de CO provém do carbono orgânico presente na farinha e da combustão incompleta.

F.L Smidth(2004) afirma que no processo de fabricação de clínquer para cimento tais fontes típicas de carbono orgânico têm origem nas matérias-primas calcário e argila.

A figura 24 mostra a variação da emissão do CO em função dos teores de carbono na farinha alimentada ao forno de clínquer.

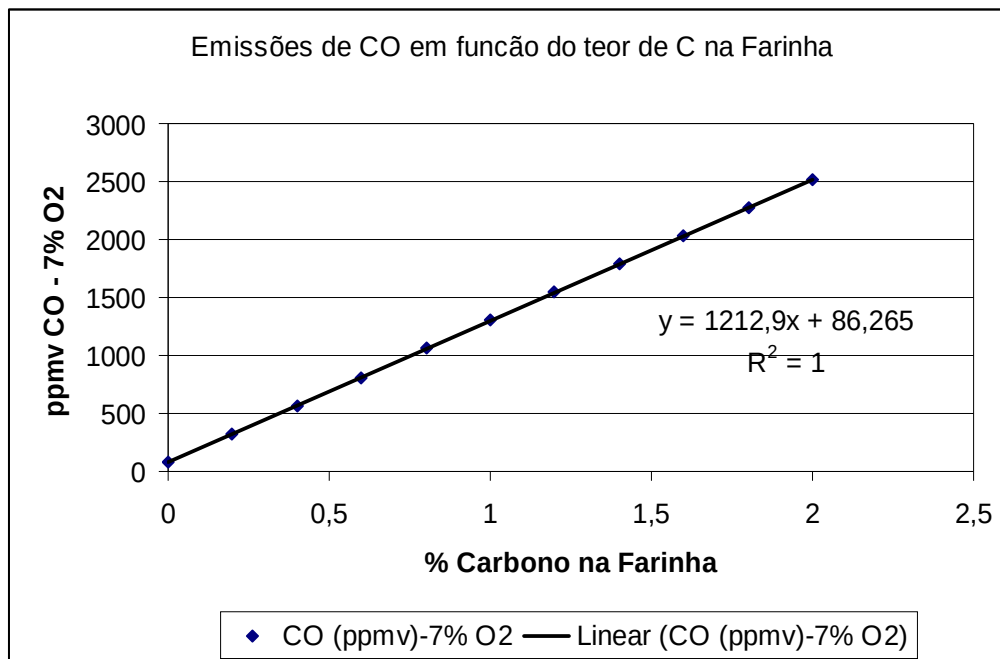


Figura 24 – Gráfico variação da emissão do CO versus teores de carbono na farinha.

Fonte: F.L.Smith

A FI Smith (2004) elaborou teste em laboratórios e demonstra através de gráfico da figura 25 que a liberação de CO proveniente do carbono orgânico da matéria prima ocorre à temperatura entre 300 e 600°C, tendo picos em torno de 400°C, ou seja, em estágios superiores na torre ciclone.

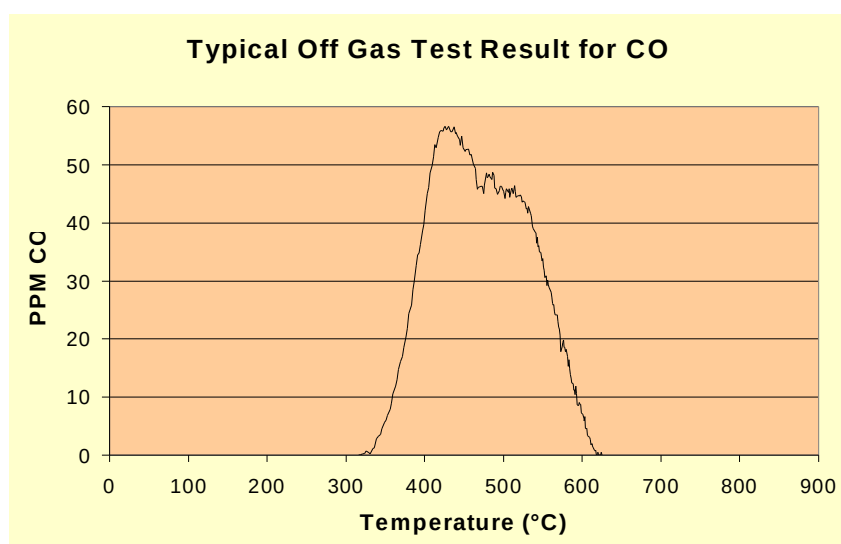


Figura 25 – Concentrações de CO vs temperaturas dos gases.

Fonte: F.L.Smith

4.2.4.1.2. Parecer prático

Como forma em demonstrar os resultados práticos foi utilizado relatório de uma cimenteira, aqui denominada de “Indústria de Cimento A”, que realizou teste para verificar a variação nos teores de CO quando co-processando resíduo, sendo o resumo do teste dispostos abaixo:

Teste – Indústria de cimento A

Resíduo – pneus inservível

Forno de clínquer com pré-aquecedor, tipo torre de ciclone

Local de injeção do resíduo – pelo 4º estágio da torre de ciclone

Teor de carbono orgânico – 0,5 (% em massa)

1º local de medição – 4º estágio da torre de ciclone (início zona de calcinação)

- Valor de concentração de CO = 460 ppm
- Valor de concentração de THC = 18 ppm

2º local de medição - 1º estágio da torre de ciclone (na entrada da torre)

- Valor de concentração de CO = 1250 ppm
- Valor de concentração de THC = 20 ppm

As medições de concentrações de CO efetuadas no início da zona de calcinação, logo após a zona de queima do resíduo pneu inservível, indicam valores abaixo de 500 ppm e o valor de THC menor do que 20 ppm, ou seja, não excede o limite estabelecido pelo CONAMA 264/99 o que comprovou a eficiência na destruição térmica dos orgânicos e eficiência do sistema de combustão.

Conforme citado no capítulo 2, figura 6, página 63, o sistema forno com pré-aquecedor, tipo torre de ciclone com 4 estágios operam com temperaturas dos gases assim distribuídos:

1º estágio ~ 350°C

2º estágio ~ 500°C

3º estágio ~ 750°C

4º estágio ~ 850°C e no final desse estágio e início da zona de calcinação ~ 950°C.

A figura 26 mostra um forno de clínquer com pré-aquecedor, tipo torre de ciclone e as distribuições das temperaturas nos 4 estágios da torre.

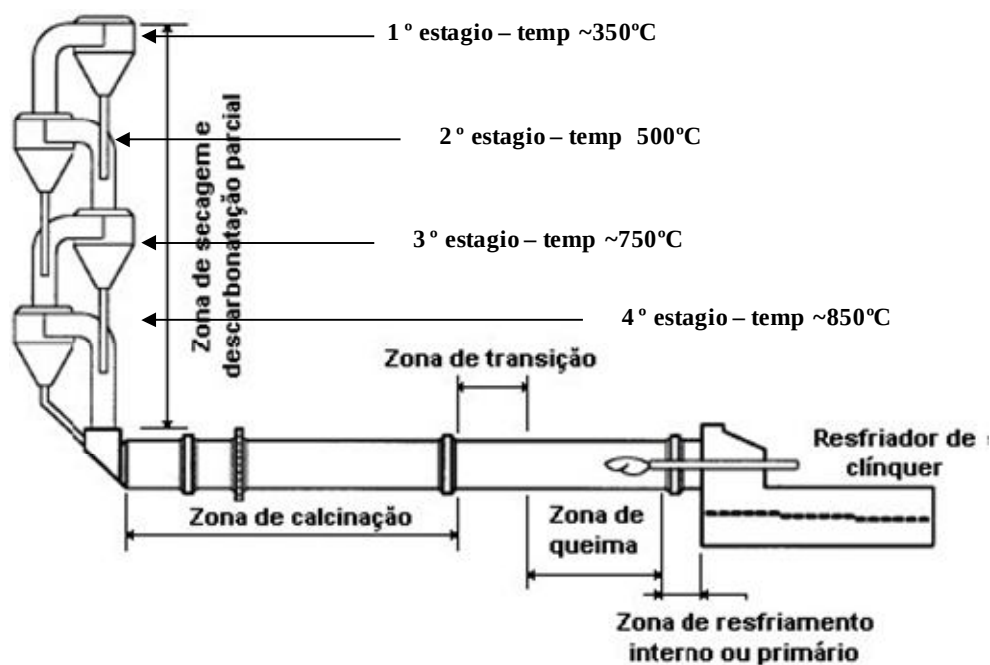


Figura 26 – Forno de clínquer com pré-aquecedor, tipo torre de ciclone.

Fonte: CEMBUREAU (1999), adaptada pelo autor.

4.2.4.1.3. Análise do resultado

O teor do carbono orgânico da fábrica de cimento A quando inserido no gráfico da figura 27 apresenta um valor de CO ~700 ppm.

Comparando esse valor com o resultado de CO encontrado na medição feita no 1º estágio da torre de ciclone e analisando o gráfico da figura 25 conclui-se que a principal fonte de CO na fábrica de cimento A é proveniente do carbono da matéria prima e não do resíduo pneu inservível co-processado.

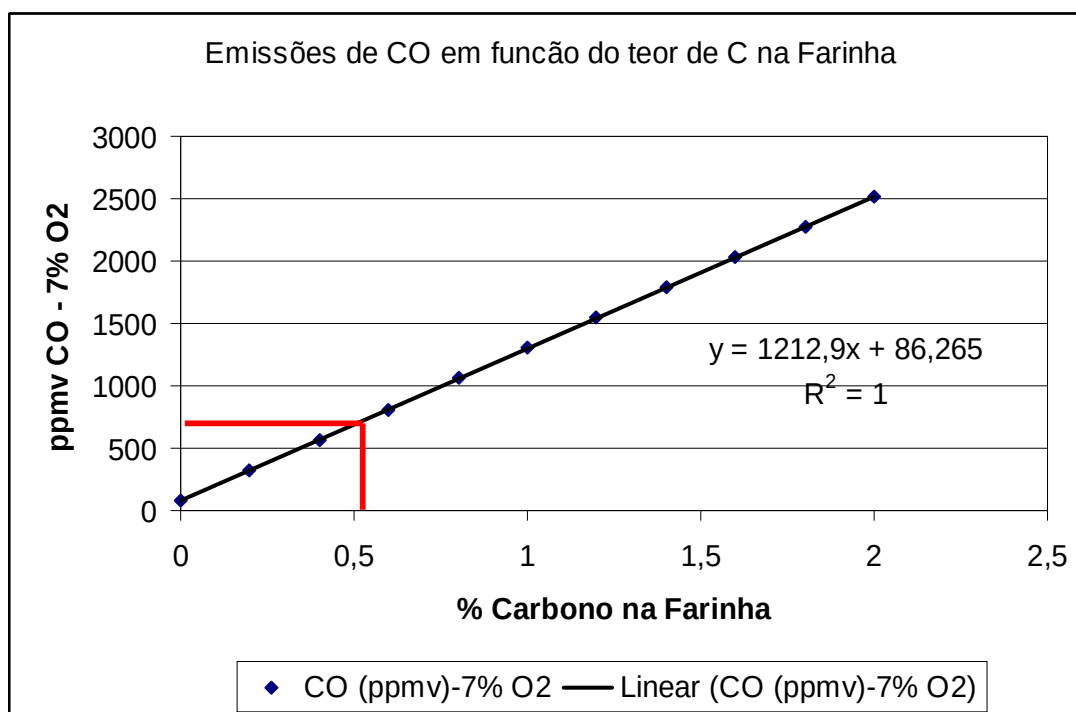


Figura 27 – Emissão de CO vs teor de C na farinha da fábrica de cimento A.

Fonte: FL Smidth, adaptada pelo autor.

4.2.4.2. Teste com poluente dióxido de nitrogênio NO_x (expresso em NO₂)

Experimento 4

4.2.4.2.1. Parecer teórico

Smart, Jenkins e VAN de Kamp (1999) comentam que os óxidos de nitrogênio (NO_x) são formados em concentrações variáveis em todos os processos de combustão, sendo essas emissões no fluxo de gases geralmente reportadas como a soma de NO e NO₂. Smart, Jenkins e VAN de Kamp (1999, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p.147)

Battye, Walsh e Lee-Greco (2000) discorrem sobre a geração dos óxidos de nitrogênio relatando que condições favoráveis para a formação de NO_x são rotineiramente alcançadas em fornos de produção de clínquer para cimento em razão das altas temperaturas intrínsecas ao processo produtivo. Referem que embora existam outras operações que utilizam gases quentes na planta industrial,

como por exemplo, a secagem de matérias-primas e combustíveis, como carvão ou coque de petróleo, elas freqüentemente reaproveitam o calor gerado no forno tornando essas contribuições desprezíveis para as emissões totais de NO_x. Battye, Walsh e Lee-Greco (2000, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p. 148)

Nesses fornos as emissões dos óxidos de nitrogênio são formadas durante a queima de combustíveis por dois dos principais mecanismos referidos:

- A oxidação do nitrogênio molecular presente no ar de combustão; e
- A oxidação dos compostos de nitrogênio presentes no próprio combustível.

As autoras observam que às vezes o material cru alimentado no forno também contém significativas quantidades de compostos nitrogenados que podem levar à formação de óxidos de nitrogênio em processo parecido com o do NO_x do combustível. Destacam que os fornos rotativos de via seca e a maioria dos fornos pré-aquecedores dispõem de somente uma zona de queima do combustível, denominada de zona de queima primária.

Os modernos fornos pré-aquecedores/pré-calcinadores e os fornos pré-aquecedores com sistema de queima no duto de ascensão dos gases dispõem de duas zonas de queima, podendo, os fornos pré-calcinadores contarem, ainda, com três zonas de queima. Como as temperaturas características nessas zonas de queima são diferentes, os fatores que afetam a formação dos óxidos de nitrogênio são também um tanto diversas para cada condição de combustão.

Na zona de combustão primária localizada na extremidade quente do forno, as altas temperaturas dos gases, usualmente acima de 1700°C, levam à formação predominante do NO_x térmico, enquanto as temperaturas mais baixas na zona secundária de queima limitam a formação por esse mecanismo.

Os fatores determinantes para a formação de NO_x térmico em forno rotativo de produção de clínquer são:

- A estabilidade da temperatura;
- A estabilidade da taxa de alimentação;
- A queimabilidade da mistura crua;
- A temperatura adiabática de chama;
- O formato da chama;
- A taxa de excesso de ar;
- Os tempos de retenção do material e dos gases na zona de queima; e
- O controle dos álcalis e do enxofre.

Tais fatores resumem-se então a parâmetros relacionados com o tipo de combustível, equipamentos e processo produtivo utilizado.

Na Figura 28 são mostradas as concentrações teóricas de equilíbrio do óxido nítrico em chaminé para diferentes níveis de excesso de ar.

Como pode ser observado as concentrações de NO acima de 1 000 ppm podem possivelmente ser formadas em temperaturas típicas da carga do forno na faixa de 1 430°C a 1 480°C, enquanto as temperaturas correspondentes à fase gasosa encontram-se na faixa de aproximadamente 1 650°C.

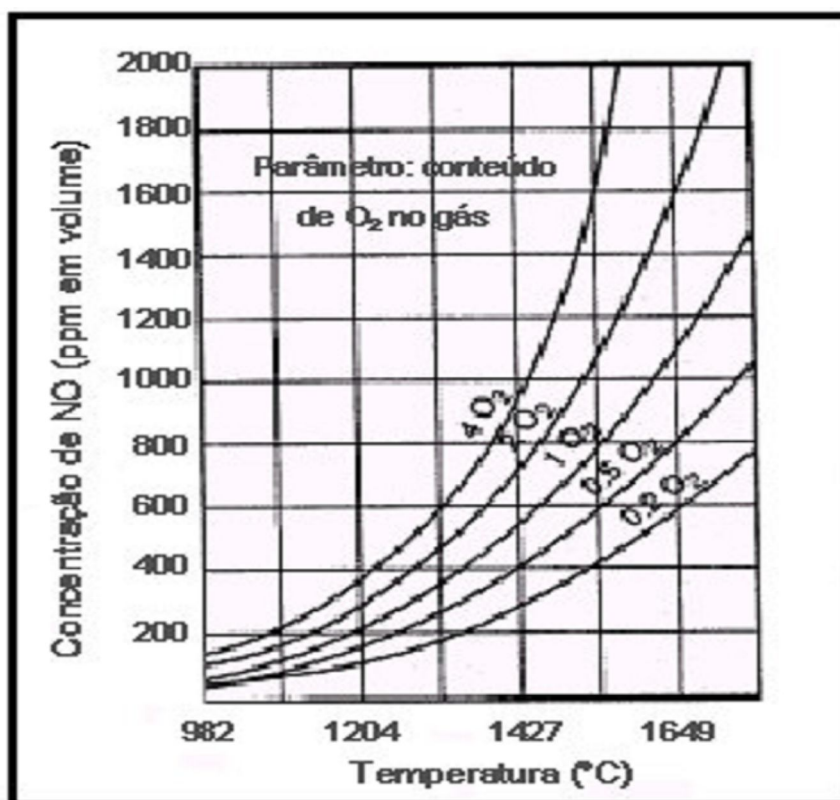


Figura 28 – Concentrações teóricas de equilíbrio de óxido nítrico no gás de combustão mantido no ar
Fonte: Greco (2000).

O segundo principal mecanismo de formação de óxidos de nitrogênio em processo de manufatura de clínquer refere-se ao NO_x do combustível. A maioria dos combustíveis, diferentemente dos gases, contém nitrogênio ligado a compostos orgânicos, os quais, durante a combustão são convertidos numa variedade de espécies de cianeto e aminas que são subsequentemente oxidadas para NO_x dependendo da disponibilidade local de oxigênio. Gardiner, (2000, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p. 151) .

Na zona secundária de queima de fornos pré-aquecedores e pré-calcinadores, onde a temperatura varia de 820°C a 1 100°C, as seguintes reações podem ocorrer, conforme apresentado por Nielsen e Jepsen (1991, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p. 152) .



Onde "N" é o nitrogênio originário dos compostos nitrogenados do combustível.

A reação (4.1) mostra que a formação de NO na zona de queima secundária dependerá do conteúdo de nitrogênio no combustível e do nível de oxigênio na zona de queima. Por outro lado, a reação (4.2) indica que se o NO já estiver presente no gás introduzido na zona secundária de queima pode ocorrer uma diminuição desse óxido devido à ação do nitrogênio do combustível como um agente redutor. Conseqüentemente, a formação líquida de NO na zona secundária de queima também dependerá da concentração inicial do NO no gás de combustão.

Os autores citam ainda que medições têm mostrado que o conteúdo volátil de combustível (sólido) e a temperatura na zona secundária de queima também influenciam a formação do óxido nítrico. Com o aumento do conteúdo volátil no combustível a razão de conversão do nitrogênio para NO parece diminuir e a taxa de reação (4.2) aumenta mais rapidamente com a temperatura que com a reação (4.1). Com isso um aumento na temperatura da zona secundária de queima talvez reduza a formação líquida de NO_x. Greco (2000) citam que adicionalmente aos mecanismos específicos de formação do NO_x, a eficiência energética do processo de fabricação do clínquer é também importante à medida que ela determina a quantidade de entrada de calor necessária para a produção de uma quantidade unitária do produto. Uma alta eficiência térmica leva a um menor consumo de calor e, conseqüentemente, de combustível produzindo emissões menores de NO_x por tonelada de clínquer.

As autoras citam que as abordagens de controle de NO_x aplicáveis para a indústria cimenteira podem ser agrupadas em três categorias:

- **Modificações de processo nas quais a ênfase é sobre o aumento de eficiência energética e produtividade:** controle de temperatura e nível de excesso de ar na zona de queima; controle da composição da mistura alimentada no sistema-forno; combustível do forno; aumento da eficiência térmica;
- **Controle da combustão onde a ênfase é sobre a redução da formação do NO_x através de:** combustão estagiada do ar através de recirculação do gás da chaminé e uso de queimadores de baixo NO_x; combustão estagiada do combustível através do uso de pré-aquecedores e pré-calcinadores e combustível derivado de pneus, assim como de pré-calcinadores de baixo NO_x e queima no meio do forno;
- **Sistemas de controle para remoção de NO_x formado no processo de combustão através de:** redução seletiva catalítica com uso de amônia anidra, diluída com ar ou vapor na presença de um catalisador (TiO₂, V₂O₅, entre outros) para injeção no fluxo gasoso (esse sistema é grandemente utilizado em incineradores e usinas de geração de energia); redução seletiva não catalítica com o uso de amônia ou uréia sem a presença de catalisador.

Essa técnica requer a injeção dos reagentes no interior do forno em temperaturas entre 870°C e 1 090°C para decompor a uréia produzindo amônia. Pode também ser usada a injeção de bio-sólidos desidratados provenientes de estação de tratamento de esgotos. O princípio básico é utilizar o conteúdo natural de amônia presente no lodo desidratado, sem uso de calor.

Greco (1999) cita que os recursos mais usuais para reduzir a emissão de NO_x em fornos rotativos incluem:

- **Redução da relação do ar primário** – com este recurso diminui-se a quantidade de oxigênio disponível para reagir com o nitrogênio e outros compostos nitrogenados nas vizinhanças do pico de temperatura;
- **Estagiamento da chama** – pelo controle das distribuições de massas e velocidades dos diversos fluxos de ar é possível fazer com que a relação temperatura/quantidade de oxigênio disponível tenha um valor adequado para inibir a formação de NO_x, num mecanismo que se realiza em duas etapas:
 - A primeira que corresponde a uma rápida ignição em alta temperatura e com baixa concentração de oxigênio; nela pode ocorrer formação de monóxido de carbono o qual inibe ainda mais a formação de NO_x;

- A segunda etapa que ocorre em temperaturas mais baixas e com alta concentração de oxigênio; nela ocorre a transformação do monóxido de carbono formado na primeira etapa para dióxido de carbono;
- **Injeção de líquidos e gases inertes** – com este recurso consegue-se o abaixamento dos picos de temperatura e/ou a expulsão do oxigênio das regiões com alta concentração de compostos nitrogenados; o procedimento é normalmente realizado por meio da injeção, no forno, de água, líquidos de alta volatilidade ou gases com baixa concentração de oxigênio (recirculados da saída do forno ou da torre);
- **Injeção de amônia na região fria do forno, isto é, a jusante da chama** – com este recurso se consegue decompor o NO_x em água e nitrogênio gasoso como resultado da reação entre a amônia e o NO_x .

4.2.4.2.2. Parecer Prático

Como forma em demonstrar os resultados práticos foi utilizado relatório de uma cimenteira, aqui denominada de “Indústria de Cimento B, que realizou teste para redução da formação do NO_x através do co-processamento de resíduo pneus inservível em volumes de 2 e 5 ton/h, sendo o resumo dos dois testes dispostos abaixo:

Nota: 1) para efeito de comparações com os resultados obtidos durante os testes, foi utilizado valores de NO_x com o forno de clínquer operando com combustível convencional sem co-processamento de resíduo e que é considerado como teste em branco .

2) Também para efeito de comparação com o valor do teste em branco , foi utilizando a média dos resultados obtidos nas três coletas amostradas durante o testes.

1º Teste – Indústria de cimento B

Período – junho /2007

Forno de clínquer com pré-aquecedor, tipo torre de ciclone

Limite máximo emissões = 800 mg/Nm^3 - CETESB

Local de medição – chaminé do forno

Local de injeção do resíduo pneu – pelo 4º estágio da torre de ciclone, início zona secundária de queima também conhecida como zona de calcinação – ver figura 26

Volume co-processado de resíduo – 2 ton/h

Valor de concentração médio de $\text{NO}_x = 572,1 \text{ mg/Nm}^3$

2º Teste – Indústria de cimento B

Período – setembro/2007

Forno de clínquer com pré-aquecedor, tipo torre de ciclone

Limite máximo emissões = 800 mg/Nm^3 - CETESB

Local de medição – chaminé do forno

Local de injeção do resíduo pneu - pelo 4º estágio da torre de ciclone, início zona secundária de queima também conhecida como zona de calcinação – ver figura 26.

Volume co-processado de resíduo – 5 ton/h

Valor de concentração médio de $\text{NO}_x = 380,1 \text{ mg/Nm}^3$

A tabela 12 e a figura 29 mostram os resultados obtidos durante os testes, onde o volume co-processado de resíduo foi de 2 ton/h e 5 ton/h

RESULTADOS OBTIDOS NO_x (mg/Nm^3)			
Volume de resíduo - pneus	em branco	2 ton/h	5 ton/h
período	ago/04	jun/07	set/07
NO_x	870,3	572,1	380,1
Limite CETESB	800	800	800

Tabela 12 – Concentrações de NO_x vs pneus -Fonte: Indústria de Cimento B – própria do autor.

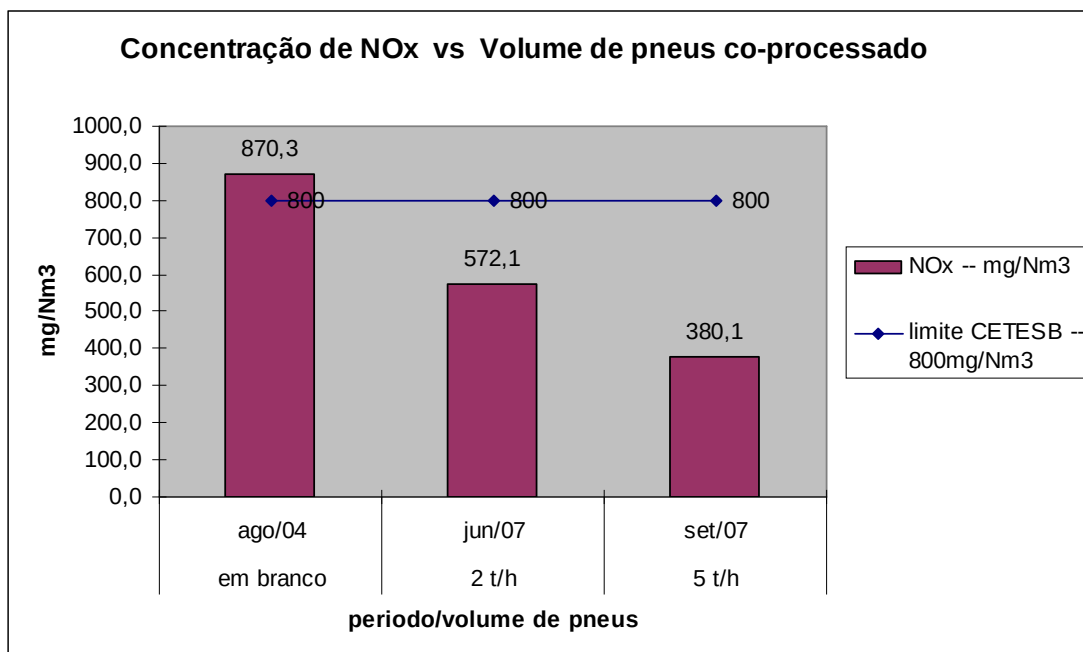


Figura 29 – Gráfico demonstrando concentrações de NOx quando co-processando resíduo em 2 t/h e 5 ton/h - Indústria de Cimento B - Fonte: própria do autor.

4.2.4.2.3. Análise dos resultados

No parecer teórico mencionado acima, foi citado que na zona de combustão primária localizada na extremidade quente do forno, as altas temperaturas dos gases, usualmente acima de 1700°C, levam à formação predominante do NO_x térmico, enquanto as temperaturas mais baixas na zona secundária de queima, entre 900 e 1100°C, limitam a formação por esse mecanismo.

O gráfico da figura 28 demonstra a relação direta da concentração de NO_x com a temperatura interna do forno de clínquer ou seja quanto maior a temperatura maior a emissões de NO_x, associadas a maiores concentrações de oxigênio.

No teste, o local de injeção do resíduo pneu foi realizado no 4º estágio da torre de ciclone, início zona secundaria de queima também conhecida como zona de calcinação onde, como citado, a temperatura varia entre 900 a 1100°C.

Portanto conclui-se que a redução de NO_x demonstrada no gráfico da figura 29 ocorreu porque ao introduzirmos um combustível alternativo, neste caso pneus, numa zona mais baixa de oxigenação e com menor temperatura, o pneu “rouba” o oxigênio residual para a queima, impedindo este de reagir com o N₂.

Por outro lado como o consumo térmico do forno medido em Kcal/ton de clínquer produzido deve ser sempre constante e para manter o balanço energético dentro do forno as temperaturas foram distribuídas para evitar superaquecimento na região do maçarico, e, por conseguinte, reduziu-se a temperatura nessa zona de combustão primária (maçarico) o que favoreceu a redução de NO_x .

A eficiência do co-processamento de pneus inservível como agente redutor de emissões de NO_x em forno de clínquer pode ser demonstrado através dos valores na tabela 12 onde no primeiro teste houve uma redução de até 34,2% de NO_x quando comparado com a concentração de NO_x no forno de clínquer sem o co-processamento de pneus e no segundo teste a redução chegou a valor máximo de 56,3% .

Isso posto, foi possível evidenciar que o co-processamento de resíduo pneus inservível na zona de queima secundária de um forno de clínquer com torre de ciclone tipo pré aquecedor reduz as emissões de NO_x contribuindo assim para redução de impacto ambiental associado a emissões atmosféricas .Por outro lado , os pneus expostos a céu aberto podem levar até 100 anos para se degradar e representam um problema ambiental e de saúde pública , pois propiciam o aparecimento de focos de dengue e estão sujeitos a riscos de incêndios . Portanto o co-processamento de pneus também contribui para a eliminação definitiva e ambientalmente segura de pneus inservíveis.

4.2.4.3. Teste com poluente óxido de enxofre – SO_x (expresso em SO_2)

Experimento 5

4.2.4.3.1. Parecer teórico

A formação e a emissão de SO_x está associada tanto às características do combustível (composição, propriedades físicas, taxa de pirólise) quanto às condições de combustão por meio dos parâmetros aerodinâmicos da chama: turbulência, distribuição das zonas de recirculação e ritmo de queima (GRECO, 1999). Segundo o autor a produção dos óxidos de enxofre em forno rotativo de produção de clínquer tem uma natureza complexa em razão dos complicados mecanismos envolvidos na sua formação e decomposição.

Bech e Gundtoft (1998) citam que os fornos equipados com pré-aquecedores, são sistemas necessariamente fechados devido às altas concentrações de material particulado seco finamente dividido existente na torre de ciclones fruto da alimentação da farinha. Bech e Gundtoft (1998, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p. 142) .

A existência dessa alta concentração de poeira no interior do pré-aquecedor promove uma verdadeira “lavagem” do fluxo gasoso que avança em contra-corrente, através da condensação de voláteis na superfície sólida, favorecendo a reintrodução desses compostos no sistema produtivo e minimizando as emissões atmosféricas. A observação dos autores é dessa maneira justificada em razão das dinâmicas diferenciadas de recirculação dos compostos de enxofre nesses sistemas.

Nielsen e Jepsen (1991) citam que o enxofre entra no processo principalmente na forma de sulfatos, sulfetos e compostos orgânicos sulfurosos, os quais podem ser reduzidos ou oxidados para o estado gasoso na forma de SO_2 e que essas emissões aumentam proporcionalmente à introdução no forno dos compostos de enxofre nos combustíveis e nas matérias-primas. Nielsen e Jepsen (1991, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p. 143) .

Os sulfatos nas matérias-primas são termicamente estáveis até temperaturas próximas a 1200°C e os sulfetos são decompostos e oxidados em temperaturas moderadas, na faixa de 400°C a 600°C , para produzir SO_2 quando aquecidos pelos gases oriundos do forno (CEMBUREAU, 1999).

Greco (1999) descreve que o ciclo do enxofre em fornos rotativos se inicia com a decomposição, em alta temperatura, dos sulfatos e sulfitos e assim, na zona de queima, uma parte desses compostos se decompõe e libera SO_2 para a fase gasosa. Na zona fria do forno esse dióxido de enxofre combina-se com os óxidos alcalinos (Ca e Mg) da farinha através de uma reação que depende tanto da concentração do dióxido de enxofre quanto da disponibilidade da área de superfície reativa na fase sólida. Smart, Jenkins e VAN de Kamp (1999) ilustram o esquema de circulação do enxofre em forno de via seca, conforme apresentado na Figura 30.

O uso de matérias-primas ricas em álcalis (Na e K) leva a um aumento da absorção de enxofre no clínquer, além de representar uma efetiva medida corretiva na produção. Sprung (1979, *apud*, MANTEGAZZA, 2004, p. 143).

alcalinos não são altas o suficiente para assegurar a completa reabsorção do SO_2 que é formado.

O sulfeto na forma de FeS_2 e o enxofre orgânico presente na farinha começam a formar SO_2 em temperaturas ao redor de 300°C e normalmente de 30% a 50% do enxofre na forma de pirita poderá ser emitido pela seção do pré-aquecedor como SO_2 gasoso em razão das condições mencionadas .(CEMBUREAU, 1999).

Uma parcela desses compostos é absorvida no moinho de cru, devido o direcionamento de parte dos gases quentes do forno para a secagem das matérias-primas, através de vigorosa movimentação do material pulverulento que maximiza o contato dos compostos de enxofre com aqueles alcalinos da farinha crua. Por esse mesmo mecanismo uma parte do SO_2 pode também ser absorvida pelo contato com os pós no interior do equipamento de controle de material particulado.

Em baixas temperaturas o SO_2 pode ser mais oxidado para formar SO_3 (gasoso). Entretanto, devido às temperaturas de lançamento dos gases do forno de clínquer e sua passagem pelo moinho de cru, onde aproximadamente 40% do SO_2 pode ser absorvido pela fase sólida, mais de 99% do enxofre emitido via chaminé será na forma de SO_2 . Então, na emissão do sistema-forno é desnecessário controlar componentes de enxofre outros que não o SO_2 .(CEMBUREAU, 1999)

Greco (1999) comenta que de modo geral a quantidade de óxido de enxofre expurgada com o clínquer depende de quatro fatores:

- Teor de enxofre no combustível
- Teores de enxofre e álcalis na matéria prima
- Tempo de permanência e temperatura da fase sólida na zona de alta temperatura do forno – fator esse que está interligado as velocidade de aquecimento e resfriamento de clínquer e, portanto a forma de chama; e
- Processo de fabricação do clínquer.

Segundo Nielsen e Jepsen (1991), e como já caracterizado por CEMBUREAU (1999), para se obter a redução da emissão de SO_2 num sistema de piro-processamento, as ações possíveis se resumem a:

- **Manter o processo existente promovendo a redução da entrada de enxofre no sistema:** medida que implica na aceitação de considerável aumento no custo do combustível com baixo teor de enxofre, visto que a redução nas matérias primas é quase impossível em fase das fontes disponíveis.

- **Modificar o processo existente:** o que implica na aceitação de maiores investimentos de capital ser tão freqüentemente necessários no sistema de piro-processamento pela redução da emissão de SO_2
- **Manter o processo existente e adicionar uma unidade de tratamento de gás exaurido:** uma alternativa que poderia ser adotada para fornos de via úmida e longos de via seca existente seria a instalação de unidades separadas de dessulfurização do fluxo gasoso .

4.2.4.3.2. Parecer Prático

Como forma em demonstrar os resultados práticos foi utilizado teste da Indústria de Cimento B que para viabilizar o co-processamento de pneus no forno de clínquer teve que atender a exigência do órgão ambiental do Estado que determina em $350\text{mg}/\text{Nm}^3$ o limite máximo de SO_2 quando co-processando. As emissões da Indústria de Cimento B estavam em concentrações aproximadas $900\text{ mg}/\text{Nm}^3$.

Para atender esse objetivo, foram realizadas quatro ações para redução do teor de enxofre presente no processo de fabricação de clínquer e para cada ação têm-se os seguintes parecer sobre sua aplicabilidade na redução do SO_2 :

1) Adição de cal virgem (CaO) ao processo na zona de queima secundária

Conforme citado no parecer teórico, nas reações 4.5; 4.6 e 4.7, da página 155, a utilização de cal virgem (CaO), no forno de clínquer via pré-aquecedor, visa a redução do SO_2 emitido através de reações com formação de CaSO_3 , que posteriormente ao combinar-se com O_2 , passaria a CaSO_4 , sendo então expurgado no clínquer produzido. No entanto um fator operacional torna a aplicação de cal livre ineficaz quando injetada na zona secundária de queima:

- Cerca de 30% do enxofre orgânico presente na matéria crua ou mesmo na forma de pirita, formar SO_2 em temperaturas próximas a 300°C , ou seja, em estágios bem superiores à zona de queima secundária, onde as concentrações de cal livre e temperatura não são altas o suficiente para assegurar a completa reabsorção do SO_2 que é formado.

2) Redução do Fator de Saturação (FS) da Farinha

Elevados fatores de Saturação na farinha implicam em 2 aspectos: O primeiro está relacionado à quantidade maior de calcário, que deverá ser usada para atingir valores mais elevados de FS, carregando conseqüentemente maior quantidade de enxofre para o sistema forno. O segundo aspecto, diz respeito à maior dificuldade de queima, gerada quando se utiliza farinha crua com valores elevados de FS. Esta maior dificuldade de queima reflete em maior quantidade de combustível necessária às reações. Sendo que quanto mais combustível se utiliza, maiores serão as taxas de evaporação de enxofre na zona de queima e maior a quantidade de enxofre, proveniente do combustível sólido, a ser introduzida no sistema.

Portanto a alternativa em reduzir o FS da farinha alimentada ao forno, visa diminuir a quantidade de combustível necessária às reações, conseqüentemente, menor taxa de evaporação e menor quantidade de enxofre no sistema. Todavia, a redução do FS está limitada em valores intimamente correlacionada com a qualidade mínima desejada do produto final, clínquer.

3) Utilização de coque nacional (maior teor de enxofre) combinado com coque importado (menor teor de enxofre), como combustível para o forno

Esta ação busca a diminuição do teor total de enxofre, via combustível sólido, adicionado ao sistema forno, através da composição de mix entre coques de diferentes teores de enxofre. No entanto na prática essa ação gera custos altos e que devem ser negociadas com as partes interessadas em função do custo elevado do combustível com menor teor de enxofre.

4) Utilização da matéria prima calcário com menor teor de enxofre em relação ao normalmente utilizado e disponível nas frentes de lavra.

A utilização de matéria-prima, calcário, com menor teor de enxofre, visa reduzir a quantidade de sulfetos, presentes nesta matéria-prima, que são decompostos e oxidados em temperaturas próximas a faixa de 400°C a 600°C, para

produzir SO₂ quando aquecidos pelos gases oriundos do forno. Ou seja, em zonas mais elevadas da torre de ciclones, onde as concentrações de cal livre, álcalis e temperatura não são altas o suficiente para assegurar a completa reabsorção do SO₂ que é formado. No entanto essa é uma alternativa quase que inviável em função das disponibilidades das reservas de calcário existente.

A tabela 13 - resume os resultados das concentrações de SO₂ quando aplicado às ações de redução do teor de enxofre (S) citadas acima

Testes	Data	média das concentrações de SO ₂ (mg/Nm ³)	Ações de redução teor de enxofre(S)				Co-processamento de pneus(t/h)
			FS farinha	Injeção de Cal(Kg/h)	%S do calcário	% S do combustível (coque)	
EM BRANCO	mai/05	900 limite CETESB 350					
1	jul-05	529,7	98	700	0,2	5,5	2
2	set-05	981,6	103	750	0,2	5,5	2
3	dez-05	939,7	103	850	0,2	5,5	2
4	jan-06	1178,7	103	1100	0,2	1	2
5	mai-06	430,4	99	0	0,04	5,5	2

Tabela 13 – Resumo dos testes para redução de SO₂.
Fonte: Indústria de Cimento B – adaptada pelo autor.

4.2.4.3.3. Análise dos resultados

Analisando os dados da tabela 13 chegam-se as seguintes observações:

- Nos testes de 1 a 5, a injeção de CaO isoladamente no forno, não se mostrou eficaz para a redução da emissão de SO₂;
- No teste 1, a redução do FS da farinha mostrou uma redução na concentração de SO₂, no entanto torna-se inviável operacionalmente para o forno reduzir ainda mais o valor do FS da farinha para chegar no limite legal estabelecido para o teste (350mg/Nm³);
- No teste 4, reduzindo o teor de S do combustível, mantendo o FS da farinha na faixa superior, a concentração de SO₂ se mantém em valores bem acima do limite legal estabelecido. (350 mg/Nm³);

- No teste 5, os níveis reduzidos de enxofre da mistura de calcário utilizada no teste permitem atingir valores mais baixos de emissão de SO_2 , mas ainda superiores ao limite legal estabelecido (350 mg/Nm^3).

Portanto, diante do exposto acima e do parecer prático, experimento 5, página 157, conclui-se que a absorção do SO_2 quando co-processando pneus e simultaneamente injetado cal virgem ambos na zona secundária não se observou alterações significativas nas concentrações desse poluente, o que só foi possível, nestes testes, quando ocorreu redução na quantidade de S do calcário. Portanto foi possível evidenciar que o co-processamento de resíduo pneus inservíveis não altera as concentrações de óxido de enxofre no forno de clínquer e que neste caso essa atividade pode se colocar como uma alternativa ambientalmente correta para a destruição da grande quantidade de pneus inservíveis gerado no país .

4.2.5. Proposta de um Sistema de Gestão para a atividade de co-processamento de resíduos Industriais

Com base nas informações obtidas sobre os procedimentos atuais nas etapas da atividade de co-processamento de resíduo na Fabrica de Cimento RJ, citadas no parágrafo anterior, foram propostos inserção de novas etapas e revisão das outras com incrementos de procedimentos que visam garantir a eficácia na gestão de resíduos co-processados em diferentes fabricas de cimentos que co-processam resíduos industriais.

O modelo proposto de gestão utiliza a analogia do ciclo do PDCA (em inglês Plan, Check e Action), que é um ciclo de análise e melhoria, criado por Walter Shewhart, em meados da década de 20 e disseminado para o mundo por Deming.

O Ciclo PDCA é uma ferramenta gerencial de tomada de decisões para garantir o alcance das metas necessárias à sobrevivência de uma organização.

O ciclo começa pelo planejamento(plan- **P**), em seguida a ação(Do – **D**) ou conjunto de ações planejadas são executadas, checka-se(check- **C**) o que foi feito, se estava de acordo com o planejado, constantemente e repetidamente (ciclicamente) e toma-se uma ação (action- **A**) para eliminar ou ao menos mitigar

defeitos no produto ou na execução e as melhorias contínuas que devem serem inseridas nesse processo.

A fig. 31 abaixo representa o ciclo do PDCA

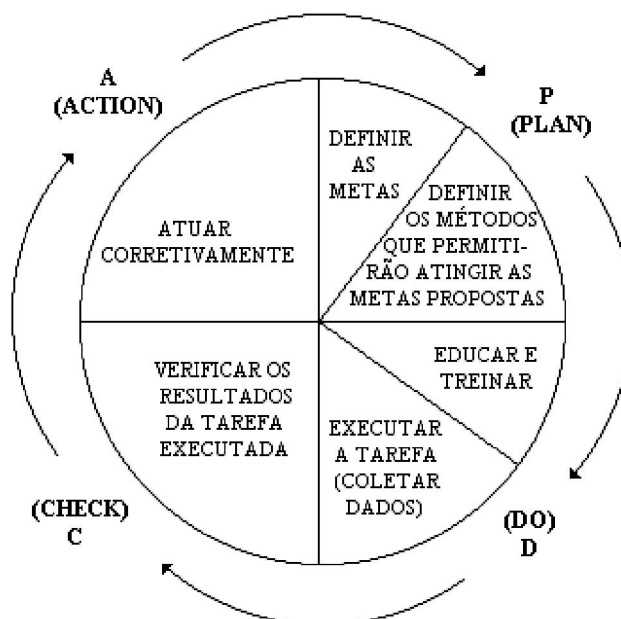


Figura 31 – Ciclo do PDCA.

Fonte: Agmar, 2004.

As etapas propostas da atividade de co-processamentos de resíduo numa Fabrica de Cimento poderão dividida em: aceite, recebimento, estocagem, injeção e destruição dos resíduos e monitoramento de emissões gasosas e materiais particulados.

Dessa forma e dentro de critério do PDCA serão propostos abaixo os procedimentos e que estão assim distribuídas:

- I - Procedimentos de aceite, recebimento e estocagem de resíduos **(P)**
- II - Procedimento de injeção (queima) de resíduo no forno **(D)**
- III - Procedimento de monitoramento dos resultados das emissões **(C)**
- IV - Procedimento de avaliação dos resultados das emissões **(A)**

I - Procedimento de aceite de resíduo (P)

As Fábricas de Cimento licenciadas para atividade de co-processamento recebem e co-processam resíduo das empresas denominadas de blendeiras as quais fornecem uma mistura (blending) de diferentes resíduos sólidos e líquidos. Tanto os resíduos sólidos quando líquidos, podem ou não possuir características energéticas.

Os resíduos sólidos sem energias térmicas normalmente são utilizados como substituto de matéria prima.

As Fábricas de Cimento também recebem resíduos sólidos na formação in natura direto dos geradores de resíduos, ou seja, sem necessidade de mistura antes de serem queimados no forno.

A primeira etapa para aceitação de um resíduo seja diretamente do gerador ou das empresas misturadoras (blendeiras), consta de uma visita de um técnico onde deve ser preenchido a planilha” Relatório de Visita” conforme anexo B com propósito de obter dados cadastrais da empresa; licença ambientais ; tipos de resíduos, conhecer os responsáveis e suas necessidades de retirada do resíduo; o tipo de transporte e armazenamento e no final coleta-se amostras do resíduo e envia para análise química. Nessa fase o técnico verifica se o resíduo está na lista dos resíduos não autorizados à co-processar conforme legislação CONAMA 264/99.

Na etapa seguinte e de posse dos dados obtidos, o técnico preenche as planilhas denominadas de “Planilha Perfil dos Resíduos”, anexo C, contendo: os parâmetros gerais, propriedades físico-químicas, dados de saúde e segurança, dados de manuseio dos resíduos e protocolo do resíduo e envia à cimenteira.

Com o resultado da análise química para hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos – HPAs, metais pesados e parâmetros gerais como temperatura, radiação, poder caloríficos, soma de óxidos e outros descritos no anexo D faz-se a seleção para aceitação em dois critérios;

Primeiro Critério: compara o resultado com os valores limites descritos na tabela anexo D e verifica se algum valor está acima ou abaixo do limite para meio ambiente e processo. O resíduo será aprovado quando todos os valores para meio

ambiente e processo estejam abaixo dos limites estabelecidos e será rejeitado quando um ou mais valor tanto de meio ambiente ou processo estiver acima do limite. Com resíduo aprovado o gerador deverá obter junto ao órgão ambiental o licenciamento para co-processar na cimenteira e em seguida passar para fase seguinte do procedimento de recebimento.

FLUXOGRAMA DE ACEITE/RECUSA DOS RESÍDUOS - 1º CRITÉRIO

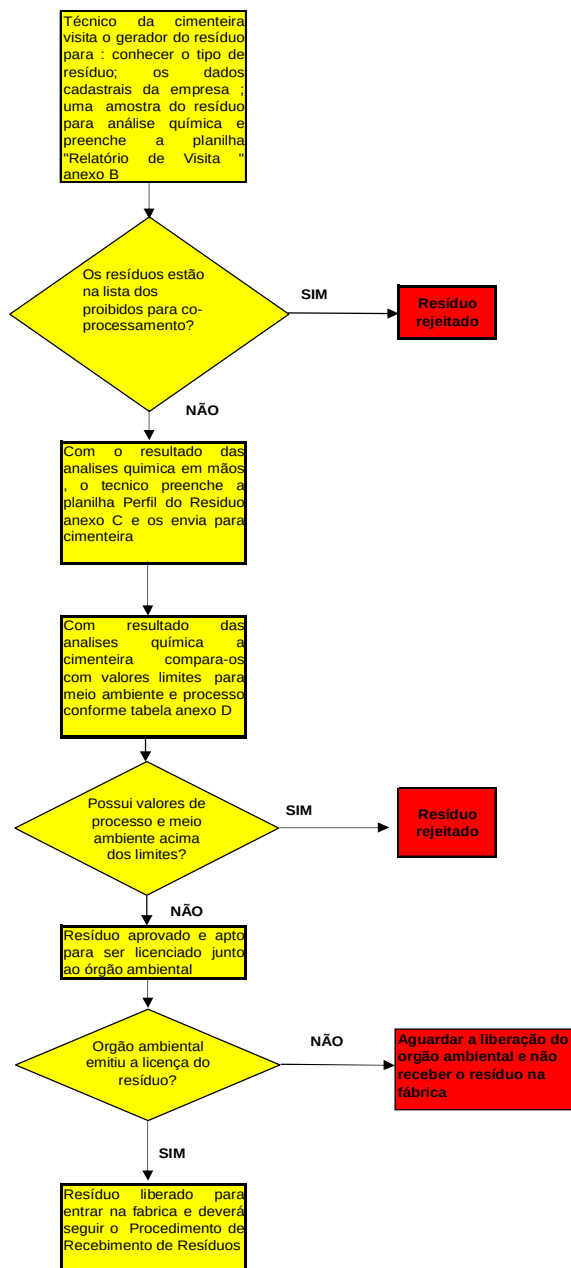


Figura 32 – Fluxograma de aceite/recusa de resíduo 1º critério – Fonte: própria do autor.

Segundo Critério: com os resultados do poder calorífico inferior – PCI (Kcal/kg) ou soma dos óxidos (% SiO_2 + % Al_2O_3 + % Fe_2O_3 + % CO) avalia se o resíduo é aceito como insumo alternativo ou recusado utilizando fluxograma da figura 33.

FLUXOGRAMA DE ACEITE/RECUSA DE RESÍDUOS- 2º CRITÉRIO

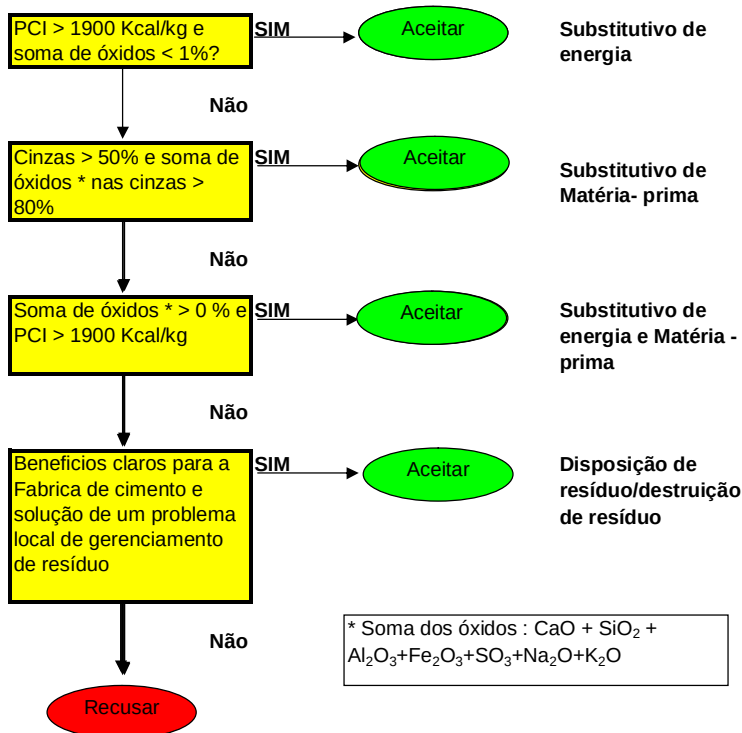


Figura 33 – Fluxograma de aceitação/ recusa de resíduos, 2º critério.

Fonte: própria do autor.

Se o teor da combinação dos óxidos de cálcio, silício, alumínio, ferro e enxofre nas cinzas for maior que 80%, esse resíduo poderá ser utilizado como matéria-prima alternativa. No entanto, ela será utilizada para recuperação de energia se o poder calorífico total desse resíduo for maior que 1900 kcal/kg. Mas se a concentração total destes óxidos for maior que zero e seu poder calorífico maior que 1900 kcal/kg, esse resíduo pode ser utilizado tanto como matéria-prima quanto de fonte de energia alternativa. É importante frisar que os resíduos devem conter os mesmos metais encontrados nas matérias-primas tradicionais.

I. 1 – Procedimento de recebimento de resíduo (P)

Os resíduos das empresas aprovados nos procedimentos de aceite são divididos em lotes e antes de entrarem nas Fábricas, os lotes deverão ser novamente avaliados quanto às características químicas e físicas seguindo os seguintes passos e conforme figura 34 – Fluxograma de recebimento de resíduos:

1. O gerador e ou blendeira envia o números do lote de preparação do resíduo e o relatório com os resultados das análises químicas e físicas de um laboratório credenciado.
2. A Fábrica avalia o relatório comparando os resultados com os valores limites do anexo D e verifica se algum valor está acima do limite e, em caso positivo o lote do resíduo será rejeitado. Tendo algum valor abaixo do limite do anexo D, o resíduo estará liberado para entrar na Fábrica para fase seguinte de estocagem.
3. No final de cada lote e antes de receber o próximo lote de resíduo, deve-se retornar ao passo 1.

FLUXOGRAMA DE RECEBIMENTO DE RESÍDUOS

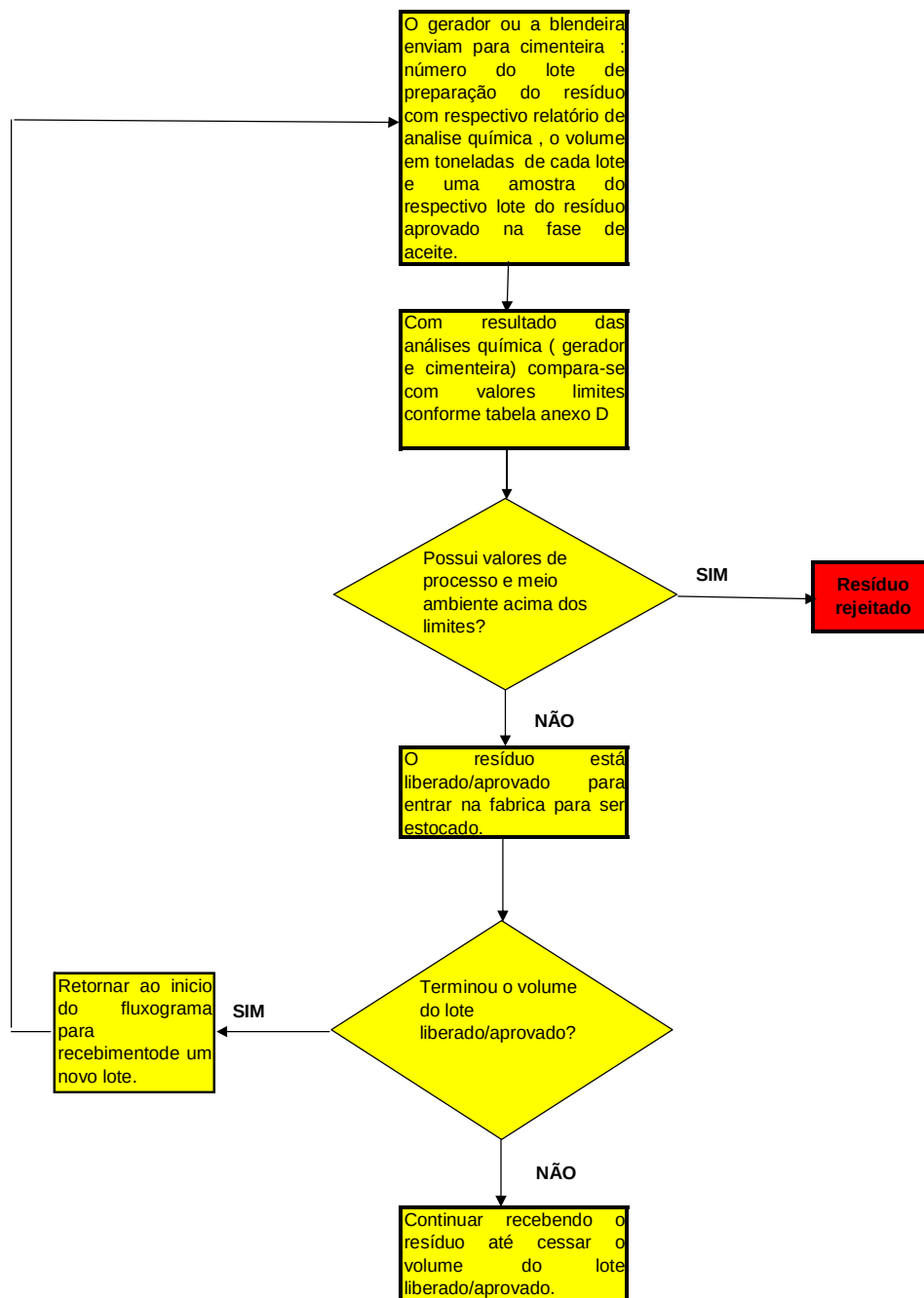


Figura 34 – Fluxograma de recebimento de resíduos

Fonte: própria do autor.

I. 2 – Procedimento de estocagem de resíduos (P)

Para atender a legislação - Portaria MINTER 124/80, os resíduos sólidos recebidos deverão ser armazenados temporariamente em galpões de resíduos com cobertura e impermeabilizado. Os resíduos líquidos devem ser armazenados em tanques fechados e áreas de contenção em torno para o caso de vazamento.

Os resíduos sólidos e líquidos em atendimento a legislação através do decreto 96.044/88 – Transporte rodoviário de produtos perigosos ser transportados por meio de caminhões até o ponto de armazenagem na Fábrica. Posteriormente deverão ser transferidos para moegas ou tanques de alimentação e deste, de acordo com seu poder calorífico ao o forno de clínquer para fase de destruição (co-processamento do resíduo).

II – Procedimento de injeção e destruição (co-processamento) dos resíduos-(D).

Os resíduos sólidos com características de matéria prima chegam ao forno de clínquer em mistura à farinha. São normalmente alimentados através de 2 sistemas:

- ✓ Moegas de calcário e argila
- ✓ Moegas de corretivos de matéria prima (bauxita, minério de ferro e outros).

Os resíduos sólidos com característica energética chegam ao forno de clínquer através do maçarico principal e pelo pré-aquecedor/calcinador na torre de ciclone.

Os resíduos líquidos com característica energética são bombeados para o maçarico principal.

Os resíduos líquidos com baixo poder calorífico são alimentados ao forno através de tubeira instalada na torre de ciclone.

As quantidades alimentadas nos pontos citados estão diretamente relacionadas com seguintes critérios para tipos de resíduos:

- Resíduos sólidos substitutos matéria prima: análise de óxidos (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 , Na_2O , K_2O) contidos no resíduo e define a quantidade para que não haja interferência na qualidade da farinha.
- Resíduos sólidos com energia térmica substituto de combustível: análise do poder calorífico inferior (PCI) e teor de cloro. Quanto maior o PCI, maior a quantidade a ser alimentada no forno. Na maioria dos fornos de cimento o teor de cloro não deve passar de 0,3%.
- Resíduo líquido com energia térmica substituto de combustível: semelhante resíduo sólido com pci, podendo se for necessário substituir 100% do combustível convencional.
- Resíduo líquido sem energia térmica: análise do teor de cloro, sendo que a quantidade a ser co-processada está diretamente relacionada com questões operacionais do forno, para que a quantidade de líquido injetado não provoque parada dos equipamentos.

Na figura 35 estão representados pontos de injeção de resíduo na planta da Fábrica de Cimento RJ

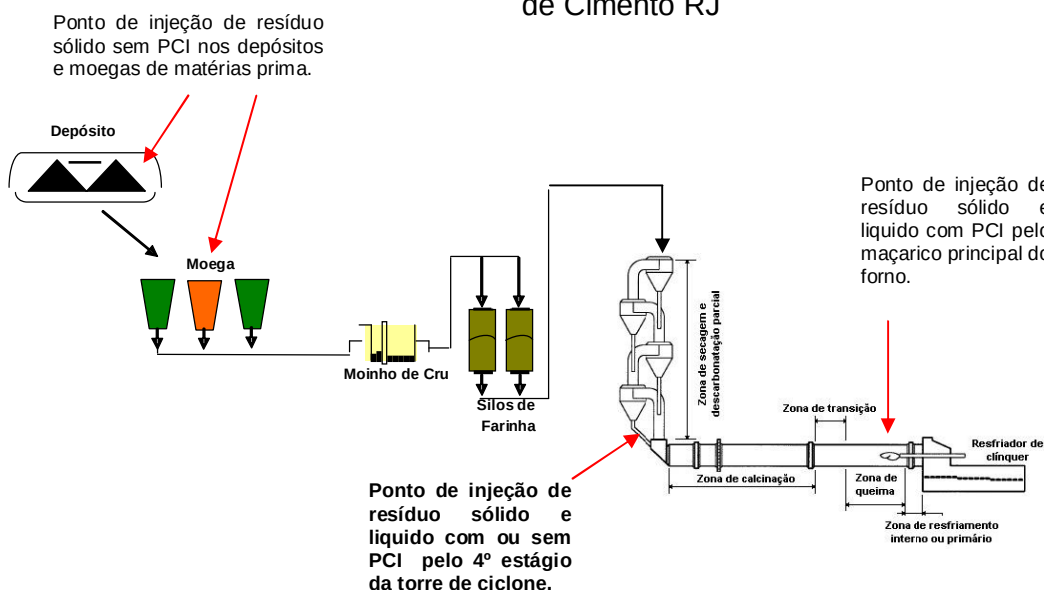


Figura 35 – Pontos de injeção de resíduo na planta da Fábrica de Cimento RJ.
Fonte: própria do autor.

II. 1 Emissão do Certificado de Destruição do Resíduo –CDR- (D)

Após destruição dos resíduos a empresa emite o certificado de destruição de resíduo – CDR para as empresas geradoras dos resíduos de forma a demonstrar às partes interessadas que os resíduos foram totalmente destruídos no forno. A figura 25 mostrar no fluxograma o caminho que o resíduo percorre até sua destruição:

O gerador do resíduo destina seus resíduos para cimenteiras de duas maneiras:

1) resíduo na forma *in natura*, ou seja, sem a necessidade de fazer misturas, o gerador (identificado no fluxograma como a *indústria D*) envia-o direto para cimenteira que o co-processa no forno de clínquer e lhe envia um certificado de destruição do resíduo (CDR) como prova legal de sua destruição. Nessa categoria os principais são: pneus, terra contaminada e silicato aluminoso (resíduo de varrição de fábrica de alumínio).

2) resíduos, como por exemplo: embalagens plásticas borra oleosas, EPI contaminados com óleo e outros, o gerador (identificado no fluxograma como as *indústria A, B, e C*) envia esses lotes para empresas de blendagens licenciadas para essa atividade. Uma parte desses resíduos são reciclados pelas blendeiras e o restante serão transformados em novos resíduos sólidos e líquidos, com características químicas e físicas apropriadas para serem utilizadas nos fornos de clínquer e enviado à cimenteiras. Estas por sua vez avaliam os resíduos conforme citado nos procedimentos de aceite e recebimento, co-processam no forno e emitem o CDR (Certificado de Destruição de Resíduo) também para as empresas geradoras.

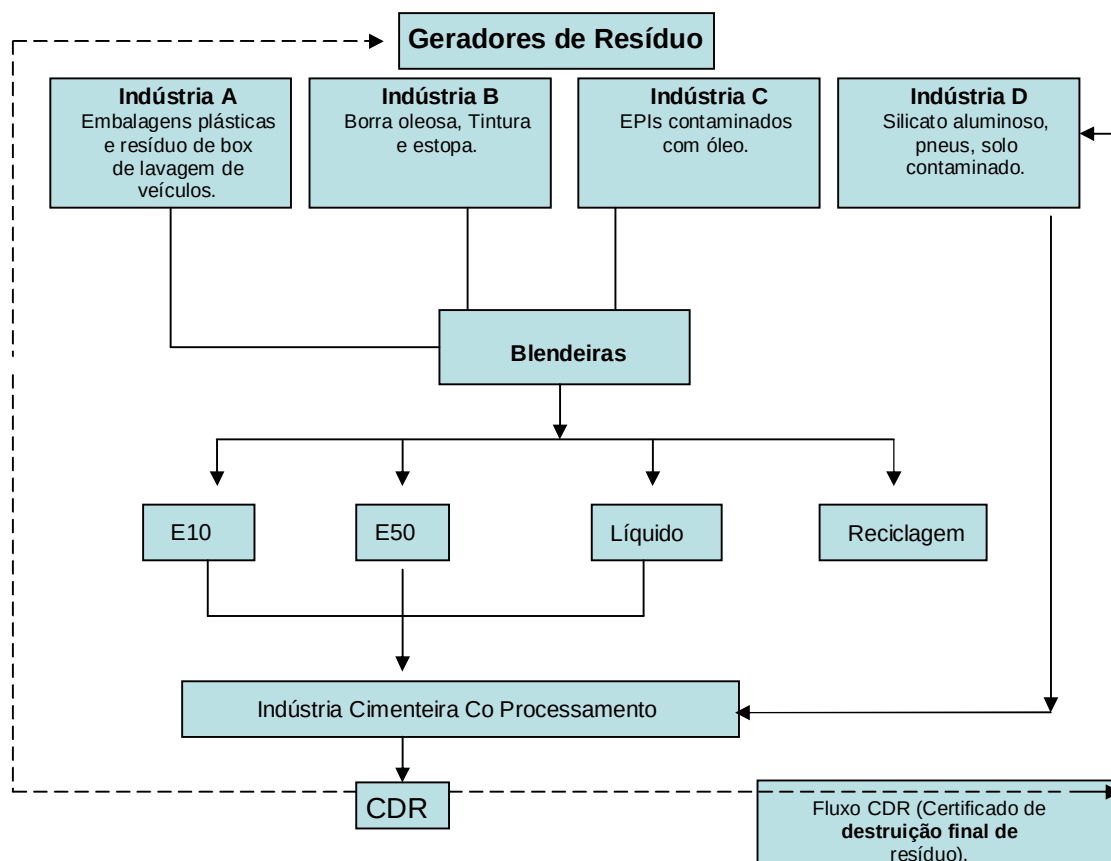


Figura 36 – Fluxograma do gerador ao co-processamento.

Fonte: própria do autor.

III – Procedimento de monitoramento dos resultados das emissões atmosféricas – Materiais particulados e gases (C)

Conforme estabelecido por legislação federal (CONAMA 264) os monitoramentos das emissões pelas chaminés do forno de cimento com co-processamento de resíduo são realizados de duas formas: descontínuos e contínuos.

O monitoramento descontínuo se caracteriza em medições que ocorrem em no máximo a cada seis meses devendo estas estar incluso seguintes poluentes: SO_2 , NO_x , CO , THC e MP .

As coletas e análises devem ser realizadas por empresa especializadas e credenciadas pelos órgãos ambientais estaduais e são baseadas nas Normas da FEEMA, CETESB, USEPA e ABNT que são metodologias apropriadas e recomendadas.

As medições devem ocorrer quando o forno está estabilizado a respeito de alimentação de resíduo, produção nominal de clínquer e temperaturas dos gases no sistema forno e temperatura de entrada do eletrofiltro.

O monitoramento contínuo ocorre através de equipamentos e sondas instalados na chaminé do filtro elétrico do forno com transmissão dos dados para um monitor no painel de comando central figura 37, e devendo estas estar incluso seguintes poluentes: SO₂, NO_x, CO , THC e MP.

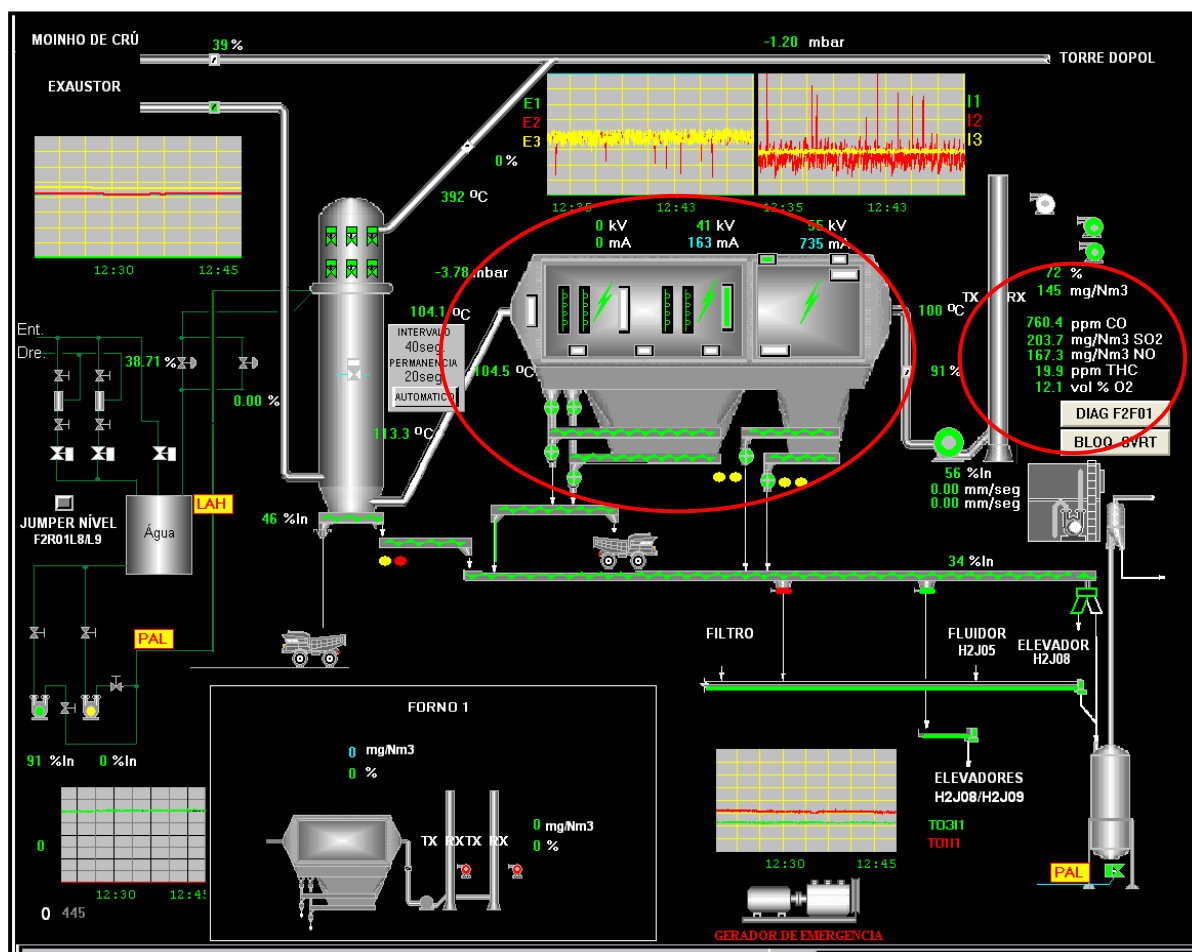


Figura 37 – Tela computador do painel central da fabrica de cimento RJ com destaque para filtro elétrico e poluente (MP; THC ,CO; SO₂; NO_x).
Fonte: adaptada pelo autor.

IV - Avaliação dos resultados das emissões atmosféricas – Material particulado e gases (A)

No monitoramento descontinuo, as empresas especializadas emitem um relatório com resultados encontrados e os limites de tolerância estabelecida pela legislação federal e estadual. Os limites de tolerâncias deve ser sempre o mais restritivos dentre as legislações.

Caso tenha resultado com parâmetros fora da faixa estabelecido pela legislação, abre-se uma não conformidade e protocola no órgão ambiental com ações para correções dos desvios.

Na tabela 14 e figura 38 estão relacionados valores médios desse poluente no período de 2003 a 2007. Os poluentes com destaque em vermelho tiveram seus valores acima dos limites estabelecidos pela legislação e, por conseguinte deveram ser abertas não conformidades e plano de ação protocolado no órgão ambiental.

Tabela 14 – Resultados das emissões atmosféricas fábrica de Cimento RJ – 2003 a 2007

Chaminé Eletrofiltro forno 2 - Fabrica de Cimento RJ					
Medições Isocineticas - semestral					
POLUENTES	CO	SO ₂	NOx	THC	MP
ANO	LIMITES TOLERÂNCIA				
	100	100	560	20	50
	CO (ppm)	SOx (mgN/m³)	NOx (mg/Nm³)	THC (ppm)	MP (mg/Nm³)
2003		14,7	198,6	5,63	64,9
2004		6,28	132,5	5,4	93,33
2005		36,02	80,8	13,5	58,4
2006	542	13,03	332	0,348	19,16
2007	757,3	30,8	694,2	1,6	55,8
*	Não era feito medição de CO. Começou em novembro/2006				
	Valores médias das medições semestral				

Fonte: Fábrica de Cimento RJ.

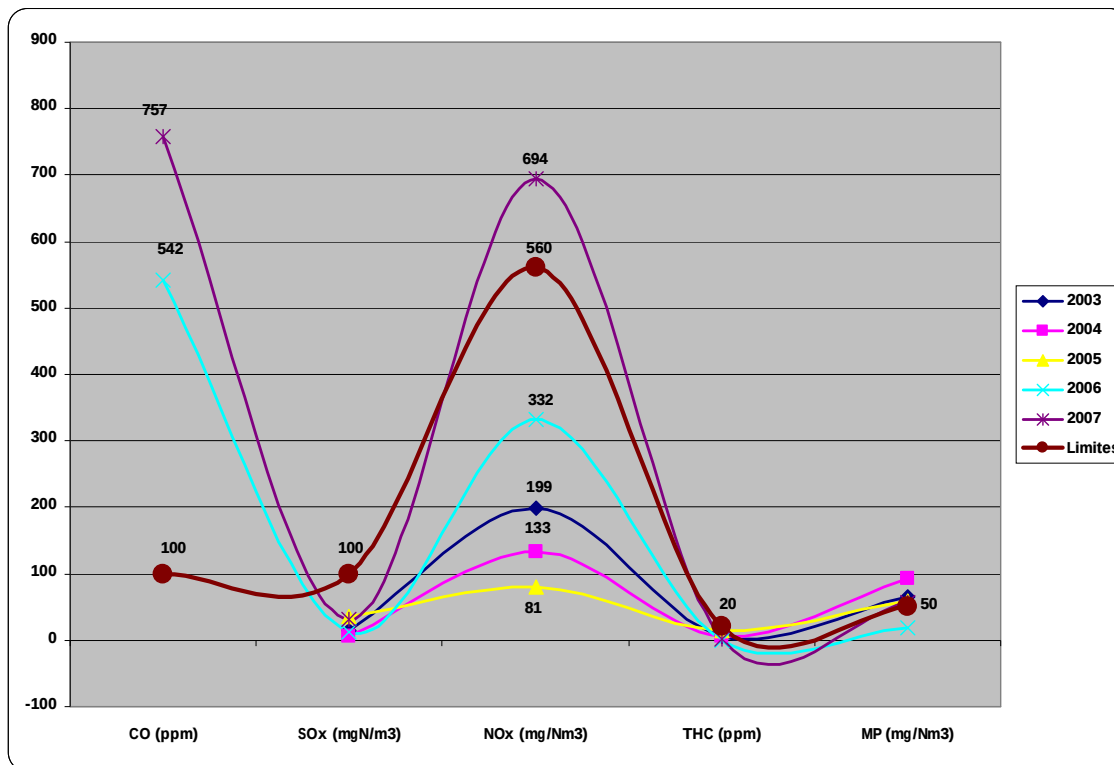


Figura 38 – Gráfico com valores dos poluentes CO; SO₂, NO_x, THC e MP no período de 2003 a 2007 da fábrica de cimento RJ.

No monitoramento contínuo os resultados devem aparecer na tela do computador localizado no painel na sala de comando das operações do forno de forma a proporcionar ao operador do forno o resultado on line das emissões atmosféricas.

A media diária desses poluentes deverão ser lançados numa planilha para análises e avaliações dos resultados e tomadas de decisão quando os valores tendem a ficar acima dos limites estabelecidos pela legislação.

A Legislação Federal – CONAMA 382 estabelece critérios para validar os resultados dos monitoramentos contínuos:

1º Critério: o monitoramento será considerado contínuo quando a fonte estiver sendo monitorada em, no mínimo, 67% do tempo de sua operação por um monitor contínuo, considerando o período de um ano;

2º Critério: a média diária será considerada válida quando há monitoramento válido durante pelo menos 75% do tempo operado neste dia, e

3º Critério: o limite de emissão, verificado através de monitoramento contínuo, é atendido quando, no mínimo, 90% das médias diárias válidas atendem a 100% do limite e o restante das médias diárias válidas atende a 130% do limite. (considerar média mensal).

A Tabela 15 mostra um modelo de planilha que poderá ser utilizado para controlar diariamente os resultados das emissões atmosférica dos poluentes: MP, CO, SO₂, NO_x e THC

MONITORAMENTO CONTÍNUO												
MÊS ABRIL	POLUENTES					Critério para validação dos resultados conforme CONAMA 382						
	CO	SO ₂	NO ₂	THC	MP							
	LIMITES TOLERÂNCIA											
	100	100	560	20	50	1º critério	2º critério	3º critério				
	ppm	mgN/m3	mg/Nm3	ppm	mg/Nm3	o monitoramento será considerado contínuo quando a fonte estiver sendo monitorada em, no mínimo, 67% do tempo de sua operação por um monitor contínuo, considerando o período de um ano;	a média diária será considerada válida quando há monitoramento válido durante pelo menos 75% do tempo operado neste dia;	o limite de emissão, verificado através de monitoramento contínuo, é atendido quando, no mínimo, 90% das médias diárias válidas atendem a 100% do limite e o restante das médias diárias válidas atende a 130% do limite. (CONSIDERAR MEDIA MENSAL)				
								CO	SO2	NO2	THC	MP
DATA	1-abr-08											
	2-abr-08											
	3-abr-08											
	4-abr-08											
	5-abr-08											
	6-abr-08											
	7-abr-08											
	8-abr-08											
	9-abr-08											
	10-abr-08											
	11-abr-08											
	12-abr-08											
	13-abr-08											
	14-abr-08											
	15-abr-08											
	16-abr-08											
	17-abr-08											
	18-abr-08											
	19-abr-08											
	20-abr-08											
	21-abr-08											
	22-abr-08											
	23-abr-08											
	24-abr-08											
	25-abr-08											
	26-abr-08											
	27-abr-08											
	28-abr-08											
	29-abr-08											
	30-abr-08											

Fonte: Própria do autor.

4.2.5.1. Análise do resultado

A leitura e análise dos relatórios da fábrica de cimento RJ, como também o acompanhamento em campo das etapas que compõe a gestão de resíduo para co-processamento desde o recebimento até a destruição no forno de clínquer, incluindo entrevista com responsável pela atividade de co-processamento desta e outra unidade do mesmo grupo cimenteiro, foi possível concluir a implementação ou o desenvolvimento de um Sistema de Gestão de Resíduo na atividade de co-processamento em forno de clínquer, desde o aceite do resíduo no gerador, recebimento na fábrica, passando pelas etapas de injeção no forno, monitoramento e chegando até a avaliação dos resultados das emissões atmosféricas, poderá se constituir em uma importante ferramenta de gerenciamento para as indústrias de cimento que co-processam resíduo reduzindo e/ou eliminando as emissões acrescidas em decorrência dessa atividade.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

Com o amadurecimento e evolução da sociedade com as questões ambientais, as pressões sobre as indústrias têm aumentado na mesma proporção, tornando-se mais críticas e passando a vir de todas as partes interessadas. Dado o crescimento industrial, a geração de resíduo passa a ser inerente à aceleração do crescimento e a disposição ambientalmente correta torna-se um desafio para essas indústrias. Nesse contexto, a indústria de cimento coloca seus fornos à disposição de outros setores para a eliminação de resíduos industriais. Essa alternativa de destruição de resíduo, considerada uma das mais eficientes, é denominada de co-processamento.

Com base nos aspectos abordados neste trabalho e nos dados disponíveis no que concerne aos aspectos quali-quantitativos, verifica-se que a contribuição tecnológica e ambiental da indústria de cimento, através do co-processamento de resíduos industriais em fornos de cimento, pode viabilizar o desenvolvimento industrial sustentável do país, sendo uma boa opção para o tratamento de alguns tipos de resíduos. Portanto, isso posto, pode-se formular as seguintes conclusões:

- Na avaliação das emissões atmosféricas, não foram observadas alterações nas concentrações de referência (vide figura 21, página 136) de material particulado (MP) emitidas para a atmosfera com o uso do filtro eletrostático operando em condições normais, quando no forno 2 foram utilizados resíduos em três diferentes níveis de volumes co-processados (período de agosto a outubro de 2007).
- Alterações nas concentrações de referência (vide figura 21, página 136) de material particulado (MP) emitidas para a atmosfera foram observadas quando e somente a temperatura de entrada do filtro eletrostático esteve superior às condições normais de operação. Este fato pôde ser evidenciado no teste efetuado nas mesmas condições acima e no mesmo período. Pode-se sugerir que, sem a influência da temperatura e sob as condições anteriores, as emissões acrescidas de MP não apresentam relação com as quantidades de resíduos co-processados.

- As concentrações de referência de hidrocarbonetos totais (THC) e material particulado (MP) emitidas para a atmosfera foram modificadas quando se adicionou à farinha, resíduo de terra contaminada com grandes concentrações de hidrocarbonetos (vide experimento 2 página 137). Esta observação refere-se ao teste efetuado no forno 2, em janeiro de 2008, quando o percentual da terra contaminada na farinha esteve acima do limite previamente estabelecido, de 0.95%, onde não ocorrem emissões acrescidas. Portanto, foi demonstrado que, nestas condições, as emissões acrescidas de THC e MP tiveram relação com as quantidades de resíduos co-processados.
- Modificações nas concentrações de referência de CO emitidas para a atmosfera foram acrescidas em decorrência do teor de carbono orgânico presente na matéria prima calcária e não do resíduo pneu inservível co-processado. (vide experimento 3 parecer prático página 142). Isto se observou quando se fez o teste no forno 2 da fábrica de cimento A, em dezembro de 2006, utilizando resíduos de pneus inservíveis. As medidas das concentrações de CO realizadas neste mesmo teste e efetuadas no início da zona de calcinação, logo após a zona de queima do resíduo pneu inservível, indicaram valores abaixo de 500 ppm_v e para o THC valores menores que 20 ppm, ou seja, não excedendo ao limite estabelecido pelo CONAMA 264/99. Isto comprovou a eficiência na destruição térmica dos orgânicos e eficiência do sistema de combustão. E por fim, o teste evidenciou que as maiores concentrações de emissões de CO ocorrem na parte alta da torre de ciclone onde a temperatura atua na faixa entre 400 e 600°C, demonstrando que o co-processamento de resíduo não interfere na emissão acrescida de CO, já que o mesmo foi co-processado na entrada do forno no início da zona de calcinação.
- A implementação ou o desenvolvimento de um Sistema de Gestão de Resíduo na atividade de co-processamento em forno de clínquer, desde o aceite do resíduo no gerador, recebimento na fábrica, passando pelas etapas de injeção no forno, monitoramento e chegando até a avaliação dos resultados das emissões atmosféricas, poderá se constituir em uma importante ferramenta de gerenciamento para as indústrias de cimento que co-processam resíduo reduzindo e/ou eliminando as emissões acrescidas em decorrência dessa atividade.

- O co-processamento de resíduo pneus inservível na zona de queima secundária de um forno de clínquer com torre de ciclone tipo pré aquecedor reduz as emissões de NO_x contribuindo assim para redução de impacto ambiental associado a emissões atmosféricas (ver parecer prático página 150). Por outro lado , os pneus expostos a céu aberto podem levar até 100 anos para se degradar e representam um problema ambiental e de saúde publica , pois propiciam o aparecimento de focos de dengue e estão sujeitos a riscos de incêndios . Portanto o co-processamento de pneus inservíveis também contribui para a destruição definitiva e ambientalmente segura de pneus inservíveis, constituindo assim uma solução para eliminação desse passivo expostos de forma irregular nas regiões urbanas e rural do Brasil.
- A absorção do SO_2 quando co-processado pneus inservíveis e simultaneamente injetado cal virgem ambos na zona de queima secundária em um forno de clinquer com torre de ciclone tipo pré-aquecedor, não tiveram alterações significativas nas concentrações desse poluente, o que só foi possível, conforme experimento 5, parecer prático, página 156, quando ocorreu redução na quantidade de S do calcário. Portanto foi possível evidenciar que o co-processamento de resíduo pneu inservível não altera as concentrações de óxido de enxofre no forno de clinquer e que neste caso essa atividade pode se colocar como uma alternativa ambientalmente correta para a destruição da grande quantidade de pneus inservíveis gerado no país.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros a ampliação da pesquisa em alguns pontos desse estudo:

Considerando que no processo de fabricação de cimento as emissões de SO_2 estão intimamente associadas a presença de do enxofre (S) na matéria prima e no combustível e considerando que estas duas fontes de enxofre são de difíceis eliminação visto que na primeira alternativa torna-se quase inviável em função das disponibilidades das reservas de calcário existente e na segunda o alto custo do combustível com menor teor de enxofre , sugere-se um estudo que identifique e

propõe novas técnicas para se obter a redução da emissão de SO_2 num sistema forno.

Considerando também que o uso de resíduo no processo de fabricação de cimento através do seu aproveitamento energético ou como matéria prima promove a conservação e racionalização dos recursos minerais e energéticos do País, sugere-se um estudo aprofundado e detalhado no processo de fabricação de clínquer de forma a propor ações que permitam utilizar o máximo de resíduo como combustível alternativo sem comprometer a qualidade do clínquer, a operação do forno e as emissões atmosféricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABETRE. Estudo sobre o setor de tratamento de resíduos industriais, 2006.

_____. Perfil do setor de tratamento de resíduos e serviços ambientais, 2006.

ABNT. NBR 10004: **Resíduos sólidos** – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 7501: **Transporte de produtos perigosos** – terminologia. Rio de Janeiro, 1989.

_____. NBR 11175: **Incineração de resíduos sólidos perigosos** – padrões de desempenho – procedimento. Rio de Janeiro, 1990.

ALMEIDA, Josimar Ribeiro de Cavalcanti; MELLO Yara Cláudia dos S. **Gestão Ambiental**: Planejamento, Avaliação, Implantação, Operação e Verificação. 1 ed. Rio de Janeiro: Thex Editora, 2000. 259 p.

ANTONIO CARLOS, G. **Técnica de pesquisa em economia e elaboração de monografia**. Editora Atlas, 4 ed., págs., 45- 69, 2002.

ARAÚJO, GIOVANI MORAES DE. **Regulamentação do Transporte de Produtos Perigosos**. RIO DE JANEIRO: [S.L.], 810P, 2001.

ARAÚJO, S. **Estudo de Formação e destruição de dioxina e furanos em fornos rotativos de produção de clínquer utilizados no co-processamento de resíduos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2002.

ASSIS FREITAS, F. **Uso do conceito prevenção da poluição no contexto da norma ISO 14001**: O caso da fábrica de fertilizantes nitrogenados da Petrobrás, UFF, pg. 203, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (2002). **Guia Básico de Utilização de Cimento Portland – BT-106**. Disponível em: http://www.abcp.org.br/downloads/arquivos_pdf/BT106_2003.pdf. Acesso em: maio de 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Folheto Co-processamento – contribuição efetiva da indústria de cimento para a sustentabilidade**. Setembro 2006.

BARROS, A.M.; TENÓRIO, J.A.S.; ESPINOSA, D.C.R. **Chloride influence on the incorporation of Cr₂O₃ and NiO in clinker**: a laboratory evaluation. Journal of Harzardous Materials, Amsterdam, v.93, n.2, p.221-232, July, 2002.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado, 1988.

BRASIL (1999). **Resolução CONAMA n.264, de 26 de agosto de 1999**. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos. Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil. Brasília, DF, 20 março 2000. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.Cfm>>. Acesso em 20 outubro 2007.

CAJAZEIRA, Jorge Emanuel Reis. **ISO 14001- Manual de Implantação**. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 1998.

CEMBUREAU. Alternative fuels in cemente manufacture, 2006.

CETESB. **Áreas contaminadas**. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/relacao_areas.asp. 2004a. Acesso em: abril 2006.

_____. **Objetivos e ações**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/português_objetivos.asp>. 2004a. Acesso em abril 2006.

_____. **Relatório da qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo**. São Paulo. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rel_aguas_2003/introdução.zip . 2004b. Acesso em: abril 2006.

_____. **Solo**. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/portugues_solo.asp. (2004 d). Acesso em: abril 2006.

CIMENTO RJ. FÁBRICA, procedimento de fabricação de cimento, 2006.

_____. FÁBRICA, Relatório de auditoria ambiental legal, 2003 – 2007.

_____. FÁBRICA, Relatório de monitoramento de emissões atmosféricas, 2003 – 2007.

CERQUEIRA. **A ORIGEM do homem e a pré-história**: como o "homem" se transformou em homem. Disponível em: <http://www.ccerqueira.hpg.ig.com.br/PreHistoria.htm>. 2004. Acesso em: abril 2006.

COIMBRA, J. A. A. (2003). In: Milaré Advogados Consultoria em meio ambiente. **Legislação ambiental**. Disponível em <http://www.milare.adv.br/legis04.htm>. Acesso em: abril 2006.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares 2002 versão 2**. São Paulo Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/inventario/introd.htm>. 2003. Acesso em: abril 2006.

EUROPEAN COUNCIL (1975). **Council Directive** 75/442/EEC of 15 July 1975 on waste. Official Journal on the European communities, Brussels, 25 July. 1975. Disponível em: <http://www.hdm-stuttgart.de/printinggreen/D75442.html>. Acesso em: 7 set. 2006.

GALVÊAS, E. C. **A revolução industrial e suas conseqüências**: da corporação de artesãos e manufaturas locais à produção em escala internacional. Disponível em: http://www.maxpages.com/elias/A_Revolucao_Industrial. 2003. Acesso em: abril 2006.

GRECO, C. Combustão em fornos rotativos: controle de processo em fornos rotativos através de modelagem de chama multi-combustível. Térmica e Fluidos Consultoria. Relatório técnico. São Paulo: G. Greco, 1996.

_____. As emissões de SO_x e NO_x em fornos de cimentos . G. Greco – térmicas e fluidos consultoria LTDA - Informativo . São Paulo, ano 2, n. 6, maio, 1999.

INDÚSTRIA DE CIMENTO A. Relatório do teste com monóxido de carbono, 2006.

INDÚSTRIA DE CIMENTO B, relatório do teste com NO_x e SO₂, 2007.

KIHARA, Y. **Co-processamento de resíduos em fornos de cimento**: tendências. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2 ed, São Paulo. Anais: São Paulo: IBRACON, 1999.

_____. **Entrevista revista HOT news**: os desafios de queimar resíduos em fornos de cimento, editora greco-enfil equipamentos termo industriais Ltda., ano 1, nº. 1, 2006.

LA ROVERE, Emilio Lebre (Coord.), et al. **Manual de Auditoria Ambiental**. 2 ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 140 p, 2001.

LIMA, L. R. **Elementos básicos de engenharia química** – conceitos básicos, balanço material, combustão e combustíveis, vapor d'água, fluídos na indústria. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1974.

MACEDO, J.A.B. **Chuva Ácida**: Introdução a Química Ambiental, Editora Jorge Macedo, 1 ed, págs., 281- 298, 2002.

_____. **Oxidantes fotoquímicos**: Introdução à Química Ambiental, Editora Jorge Macedo, 1 ed, págs., 475 – 481, 2002.

MANTEGAZZA, E., **Aspectos Ambientais do Co-processamento de resíduos em fornos de produção de clínquer no estado de São Paulo**. São Carlos, págs. 360, 2004.

MANTUS, E. K. **Resolução CONAMA n.316, de 29 de outubro de 2002**. Dispõe sobre os procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil , Brasília, DF, 20 nov. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 20 out nov. 2003.

_____. **All fired up**: burning hazardous waste in cement kilns. Seattle: Environmental Toxicology International, 1992.

MARINGOLO, V., **Clinquer co-processado**: Produto de Tecnologia Integrada para Sustentabilidade e Competitividade da Indústria de Cimento, USP, págs. 174, 2001.

MENON, G. J. et al. **Estudo do processo de combustão nos fornos rotativos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 3 ed, 1993, São Paulo. Anais. São Paulo: ABCP. págs. 479-497, 1993.

OPPELT, E.T. **Hazardous waste destruction**. Environmental Science Technology, Easton, v.20, n.4, págs.312-318, 1986.

PEREIRA, L.A.P. BRAGFA, A. & SALDIVA, P.H. NA., **Poluição do Ar e seus efeitos na saúde humana**. Faculdade de Medicina da USP, pág. 20.

QUINTEIRO, AGMAR Carvalho. **Estudo de caso**: o atendimento do processo de gestão ambiental, através de um sistema integrado de gerenciamento de resíduos sólidos industriais, **sir** Dissertação (Mestrado em Sistema Gestão Ambiental) – UFF – LATEC, 188p, 2004.

REHAN, R. & NEHDI, M., **Carbon dioxide emissions and climate change**: policy implications for the industry, Environmental Science & Policy, Editora Elsevier, págs 105 – 114, 2005.

REIMBERG, Cristiane. **Prevenção nas Cimenteiras**. Revista Proteção, Edição 174, ano XIX, págs., 48-56.

ROCHA, J.C, ROSA, A.H & CARDOSO, A. A; **Introdução a Química Ambiental**. Editora Bookman, 1 ed, págs, 66- 97, 2004.

SANTI, A.M.M & SEVÁ Fº., A.O., **Resíduos renováveis e perigosos como combustíveis industriais**. VIII Congresso Brasileiro de Energia, RJ, pg. 18, 1999.

SANTOS NETO, B.C. & XAVIER, R.A., **Riscos Químicos nas atividades de co-processamento em fornos de clínquer**. UFF, págs. 96, 2005.

_____, B.C., GAMBOA, C.M & VALENTIM, J.A., Auditoria Ambiental: uma ferramenta indispensável na estratégia da gestão ambiental, UFF, pg. 109, 2004.

SÃO PAULO. **Constituição do Estado de São Paulo**. São Paulo, SP: Assembléia Legislativa, 1989.

SAXENA, S.C.; JOTSHI, C.K. **Management and combustion of hazardous wastes**. Progress in Energy and Combustion Science, Oxford, v.22, n.5, págs.401-423, 1996.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Produção de Cimento**. Disponível em: http://www.sindicatodocimento.org.br/f_numeros.asp. Acesso em maio de 2007.

SMIDTH, F.L. (2004). Dry process kiln systems. Disponível em: <<http://www.flsmidth.com/f.l.smidth/English/contact/brochures+and+info/brochures/kilns+and+firing+dryprocesskiln.pdf>>. Acesso em 10 outubro de 2007.

THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION. **Alternative fuels in cements manufacture**. Disponível em: <http://www.cembureau.be/Documents/Publications>. 1997. Acesso em: junho 2006.

TREZZA, M.A. & SCIAN, A.N., **Waste fuels**: their effect on Portland cement clínquer, Cement and Concrete Research, Editora Elsevier, págs, 438-444, 2005.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2001).Climate change 2001: scientific basic – the carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. Disponível em:<<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 2 Aug. 2007.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Emission factor documentation for AP-42, section 11.6, Portland cement manufacturing – final report**. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/final/c11s07.pdf>. 1994. Acesso em: maio de 2006.

WAGNER, C.T. **Efeitos do co-processamento de resíduo contendo cromo sobre a reação de clinkerização**, PUC-Rio, pg. 113, 2004.

WERTHER, J. & OGADA, T. **Sewage Sludge Combustion, Progress in Energy and Combustion Science**. Editora Pergamon, págs, 55-116, 1999

ANEXOS

ANEXO A – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CIMENTO FÁBRICA DE CIMENTO – RJ

ANEXO B – RELATÓRIO DE VISITA A GERADORES DE RESÍDUOS

1. DADOS DA INDÚSTRIA GERADORA DO RESÍDUO

Razão

CNPJ:

Inscrição

Endereço da Unidade

Responsável pelos resíduos:

Cargo:

Fone:

Fax

e-

Principal Atividade da

Produtos

Indústria:

Manufaturados:

2. NECESSIDADES DO CLIENTE:

Necessidade de

Retirada:

urgente

☐

não

☐

Motivo:

Requer apoio para o

condicionamento do resíduo

gerado ou estocado:

sim

☐

não

☐

Existe interesse em visitar a

Fábrica:

sim

☐

não

☐

3. LICENÇAS

Onde será Licenciado o

Resíduo:

Responsável pela

Licença:

Empresa geradora

☐

Cliente

☐

Possui

sim

☐

não

☐

Caracterização:

incompleta

☐

Responsável pela

Caracterização:

Empresa

☐

Cliente

☐

Elementos

faltantes:

Valor a ser cobrar pela

Caracterização:

OBS:

4. TRANSPORTE

**Responsável pelo
transporte:**

**Responsável pelas
Licenças:**

Carga Mista:

Nº Ident.

ONU:

Valor do

Transporte/Licença:

**Empresa
geradora**

**Empresa
geradora**

Sim

Numeração de

Risco:

Cliente

Cliente

Não

OBS:

Responsável pelo contato comercial:

Data: / /

ANEXO B (cont.) – RELATÓRIO DE VISITA A GERADORES DE RESÍDUOS

OBS. Esta parte do relatório de visita deverá ser preenchido para cada resíduo.

RESÍDUO GERADO:

Denominação:

Geração mensal:

Passivo:

Estado Físico:

Está acondicionado?

Existe Separação de fases?

Forma de acondicionamento?

Condições das embalagens:

Está sobre palletes?

Está identificado?

Periodicidade de envio:

Destinação Atual:

Descrição do processo gerador:

MANUSEIO NA FÁBRICA

É derramável?

sim ☐

não ☐

Necessita ferramenta?

sim ☐

não ☐

Permite aquecimento?

sim ☐

não ☐

Necessita destruir embalagem?

sim ☐

não ☐

Reatividade:

sim ☐

não ☐

Coment:

Incompatibilidade Química:

sim ☐

não ☐

Coment:

Odor de :

25 °C:

forte ☐

médio ☐

fraco ☐

°C:

forte ☐

médio ☐

fraco ☐

ANEXO C – PERFIL DO RESÍDUO – GERAL

		PERFIL RESÍDUOS				GERAL	
						1 de 5	
Nomenclatura				Industria de Origem			
Codificação de Resíduos (Nacional)				Codificação VC			
Potencial (e/ou)		☐ AR ☐ AF					
Fonte				Usuário			
Gerador de Resíduo		☐	Planta Blendagem	☐	Fábrica		☐ Planta Blendagem ☐
Empresa				Empresa			
Endereço				Endereço			
Contato				Contato			
Telefone				Telefone			
Fax				Fax			
E-mail				E-mail			
Processo de geração de Resíduos							
Principais Constituintes		Fórmula Química		Mínimo	Média	Máximo	
				%	%	%	%
				%	%	%	%
				%	%	%	%
				%	%	%	%
				%	%	%	%
Disponibilidade do Resíduo							
Do processo		☐	t / ano	Duração Esperada			
Capacidade estocagem				Pontual	☐	> 1 ano	☐ < 1 ano ☐
Do estoque		☐	estoque	t custo / t			
Expedição de Resíduo							
Tempo de Expedição				Transporte			
Contínuo durante o ano		☐	Trem	☐	Tambor	☐	Caminhão tanque ☐
Irregular/Sazonal		☐	Big bag	☐	Carga seca	☐	Caminhão granel ☐
Propriedades Macroscópicas							
Sólido	☐	Tamanho Max partícula / mm		Geração de Pó		alto	☐ ☐ ☐ baixo
		>100	☐	10 - 1	☐	Corpos estranhos	frequente ☐ ☐ ☐ nenhum
		100 - 10	☐	< 1	☐	Escoabilidade	alto ☐ ☐ ☐ baixo
		Homogêneo	☐ sim ☐ não			Pegajosidade	alto ☐ ☐ ☐ baixo
Pastoso	☐	Homogêneo	☒ sim ☐ não			Pegajosidade	alto ☐ ☐ ☐ baixo
						Corpos estranhos	frequente ☐ ☐ ☐ nenhum
Líquido	☐	aquoso	☐	orgânico	☐	Viscosidade	alto ☐ ☐ ☐ baixo
		Diferentes fases		☐	Partículas		muito ☐ ☐ ☐ nenhum
						Sedimentação	forte ☐ ☐ ☐ fraco
Outras características		Forte odor de amônia					
Cor		escura	☐ ☐ ☐	clara	Odor		forte ☐ ☐ ☐ fraco
Resíduos Banidos							
Resíduos Hospitalares		☒ sim ☐ não	Explosivos		☒ sim ☐ não		
Resíduos contendo asbestos		☒ sim ☐ não	Resíduos com alta conc. Cianetos		☒ sim ☐ não		
Resíduos bio-perigosos		☒ sim ☐ não	Ácidos Minerais		☒ sim ☐ não		
Fragmentos Eletrônicos		☒ sim ☐ não	Resíduos radioativos		☒ sim ☐ não		
Baterias		☒ sim ☐ não	Lixo Urbano não classificado		☒ sim ☐ não		

ANEXO C (cont) – PERFIL DO RESÍDUO – PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS

PERFIL RESÍDUOS				PROPRIEDADES FÍSICAS & QUÍMICAS				
				2 de 5				
Nomenclatura		0		Indústria de Origem		0		
Laboratório Analítico				Fonte de Informação				
Empresa				Data				
Endereço				Informação da Amostra				
				Amostra pontual	☐	Amostra composta	☐	
Contato				Coletada por				
Telefone		Fax		Comentários				
Email								
Propriedades Físicas e Químicas								
		Min.	Média	Max.		Min.	Média	Max.
H ₂ O (como recebido) %					Ponto de Ebulição °C			
Viscosidade Pa					Ponto de Fusão °C			
Densidade kg / m ³					Resíduo na #mm	%		
Densidade bulk kg / m ³					Resíduo na #mm	%		
pH					Resíduo na #mm	%		
Compostos solúveis em água								
Propriedades Orgânicas								
Preparação Amostra		Secagem c. ar	☐	Secagem	☐	Outra	in natura	
		Amostra Média	Estimado Min.	Max.		Amostra Média	Estimado Min.	Max.
Teor de cinzas %					S	%		
Teor de voláteis %					C	%		
PCS MJ / kg					H	%		
PCI MJ / kg					PCB	ppm		
Ponto de Fulgor °C					HAP	ppm		
TOC %					Fenóis	ppm		
Propriedades Inorgânicas								
Preparação Amostra		Secagem c. ar	☐	Secagem	☐	Outra	in natura	
Componentes Minerais		Min.	Média	Max.		Min.	Média	Max.
Quartzo %					Outro			
Principais Óxidos	PF	%			Elementos Traços	Cd	ppm	
	SiO ₂	%				Hg	ppm	
	Al ₂ O ₃	%				Tl	ppm	
	Fe ₂ O ₃	%				As	ppm	
	CaO	%				Ni	ppm	
	MgO	%				Co	ppm	
	SO ₃	%				Se	ppm	
	K ₂ O	%				Te	ppm	
	Na ₂ O	%				Cu	ppm	
	TiO ₂	%				Pb	ppm	
	Mn ₂ O ₃	%				Sb	ppm	
	P ₂ O ₅	%				Sn	ppm	
Halogêneos e outros	F	%				V	ppm	
	Cl	%				Be	ppm	
	Br	%				Ba	ppm	
	I	%				Mn	ppm	
	CN	%				Zn	ppm	
	NH ₃	%				Cr	ppm	
					Cr 6+	ppm		
					Mo	ppm		
					Te	ppm		

ANEXO C (CONT) – PERFIL DO RESÍDUO – SAÚDE E SEGURANÇA

		PERFIL RESÍDUOS		SAÚDE & SEGURANÇA	
Nomenciatura		0		Indústria de Origem 0	
3 de 5					
MSDS					
Disponível	☒	Não disponível	☐		
Identificação de Perigo					
Inflamável	☒	Irritante	☒	Pelo contato com os olhos	☒
Corrosivo	☒	Nocivo	☒	Pelo contato com a pele	☒
Reativo	☒	Tóxico	☒	Por inalação	☒
Inalável	☒	Carcinogênico	☐	Por ingestão	☒
Risco de Reações Perigosas					
com ↓ \ para →	Vapor Tóxico	Ignição	Explosão	Polimerização	Solidificação
Alta Temperatura	☒	☒	☐	☐	☐
Alta Pressão	☐	☐	☐	☐	☐
Água	☒	☐	☐	☒	☐
Ar	☐	☐	☐	☐	☐
Ácidos	☒	☐	☐	☐	☐
Bases	☒	☐	☐	☐	☐
Oxidantes	☒	☐	☐	☐	☐
Redutores	☒	☐	☐	☐	☐
Outros	☐	☐	☐	☐	☐
Comentários					
Proteção Pessoal					
Luvas resistentes à ácidos	☐	Capacete de segurança	☒	Luvas de segurança	☒
Máscara de proteção facial total	☐	Óculos de segurança	☒	Máscara de proteção facial parcial	☒
Primeiros Socorros					
Medidas Apropriadas					
Medidas Inapropriadas					
Instruções em caso de Incêndio					
Medidas Apropriadas					
Medidas Inapropriadas					
Riscos específicos/ Instruções					
Instruções em caso de Vazamento					
Procedimentos de Limpeza					
Procedimentos de Recuperação					
Procedimentos de Disposição					
Contato em caso de emergências					
Transporte					
Código de Perigo		Código de Transporte		Código do Resíduo	

ANEXO C (CONT) – PERFIL DO RESÍDUO – MANUSEIO DE RESÍDUO

		PERFIL RESÍDUOS				MANUSEIO RESÍDUOS	
Nomenclatura	0			Indústria de Origem	0		
Codificação de Resíduos (Nacional)				Codificação VC			
Quantidade Consumida	t / ano			t / h (média)		t / h (max.)	
Pré-Tratamento							
Secagem	☐	Moagem	☐	Peneiramento	☐	Trituração	☐
Blendagem	☐	Outros:					
Comentários							
Estocagem							
Estocagem Aberta	☐	Estocagem Coberta	☐	Piso com geomembrana	☐	Piso sem selo	☐
Contêiner	☐	Silo	☐	Tanque	☐	Tremonha	☐
Tambores	☐	big bag	☐		☐	Tremonha de fundo móvel	☐
Outro:				Capacidade de estocagem			
Comentários							
Extração da Estocagem							
Pá carregadeira	☐	Tremonha de fundo móvel	☐	Aeração	☐	Ativação Mecânica	☐
Ponte	☐	Correia / Balança	☐	Outro:			
Comentários							
Transporte da Estocagem para o Processo							
Pá carregadeira	☐	Ponte	☐	Transportador especial	☐	Elevador	☐
Hidráulico	☐	Tipo de bomba:		Rosca	☐	Cinta	☐
Pneumático	☐			Outro:			
Comentários							
Dosagem							
Gravimétrica	☐			Volumétrica	☐		
Belt scale	☐	Medidor de Impacto	☐	Válvula Rotativa	☐	Cinta alimentadora	☐
Lossweight feeder	☐	Medidor Coriolis	☐	Bomba de deslocamento Positivo	☐	Rosca Alimentadora	☐
Rotor weigh feeder	☐	Outro:				other:	
Comentários:							
Alimentação ao Processo							
Britador de Mat. Pri.	☐	Moagem de crú	☐	Torre	☐	Entrada do Forno	☐
Pre homo	☐	Moinho de Pasta	☐	Lepol grate	☐	Mid kiln	☐
Tremonha de Pasta	☐	Moinho de carvão	☐	Calcinador	☐	Próximo ao queimador principal	☐
Outro:						Queimador principal	☐
Comentários:							
Controle de Qualidade							
Comentários							
Fatores Limitantes para Utilização							
Disponibilidade de Mercado	☒	Problemas de Manuseio	☐	Capacidade de Alimentação	☐	Custo	☐
Principais óxidos	☐	Cloretos	☐	Elementos Traços	☐	Toxicidade	☐
Teor de Umidade	☐	Licença	☐	Outro:			

ANEXO C (CONT) – PERFIL DO RESÍDUO – PROTOCOLO

		PERFIL RESÍDUOS		PROTOCOLO	
Nomenclatura	0	Indústria de Origem	0	5 de 5	
Codificação de Resíduos (Nacional)		Codificação VC			
Quantidade Consumida	t / year	t / h (média)	1	t / h (max.)	
ORIGEM DO RESÍDUO					
EMPRESA	0				
SETOR DE ATIVIDADE	0				
PROCESSO GERADOR (descrição detalhada)					
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS					
ESTADO FÍSICO/ASPECTO	COR	PONTO DE FULGOR	ODOR	pH	
COMPOSIÇÃO					
COMPOSIÇÃO PROVÁVEL TOTAL:					
COMPOSIÇÃO PROVÁVEL DA FRAÇÃO VOLÁTIL (TEMPERATURA E PRESSÃO AMBIENTE):					
COMPONENTES PERIGOSOS (NOME QUÍMICO E FAIXA DE CONCENTRAÇÃO- % EM MASSA):					
INCERTEZAS:					
PROPRIEDADES ORGANOLEPTICAS E PERCEPÇÕES DOS TRABALHADORES					
CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO PARA FINS DE COMUNICAÇÃO DE RISCOS					
CLASSIFICAÇÃO:					
SÍMBOLOS	INDICAÇÕES DE PERIGO	FRASES R	FRASES S		
					
TRANSPORTE/ARMAZENAMENTO					
TIPO DE VEÍCULO	ACONDICIONAMENTO	ARMAZENAMENTO	DISPONIBILIDADE MENSAL		
FATORES DE RISCO À SAÚDE DOS TRABALHADORES E MEDIDAS PREVENTIVAS					
ATIVIDADE	TIPO DE CONTATO OU EXPOSIÇÃO	EFEITO CRÍTICO	LIMITES DE EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL		
RESPONSÁVEIS PELO LEVANTAMENTO DE RISCOS QUÍMICOS:					
xxxx CRQ XXX					
MEDIDAS PREVENTIVAS					
EPI'S RECOMENDADOS					
MEDIDAS PREVENTIVAS ESPECÍFICAS (DE ENGENHARIA OU ADMINISTRATIVA)					
PPRA:					
PCMSO:					
RESPONSÁVEIS PELO LEVANTAMENTO DAS MEDIDAS PREVENTIVAS					
XXX CRM XXX		XXX ENGENHEIRO SEGURANÇA			

ANEXO D – ESPECIFICAÇÃO DE RESÍDUO

Parâmetros	Limite - Parâmetros Gerais	Limites Parâmetros Processo	Limites Parâmetros SMA
Gerais			
Aparência Física		Sólido com odor aceitável	
Radiação (msv)			< 50
Poder Calorífico Inferior- PCI (Kcal/Kg) ou Soma de óxidos (% SiO ₂ +%Al ₂ O ₃ + % Fe ₂ O ₃ + % CaO)	* Ver fluxograma de aceitação ou recusa do resíduo fig 22		
Cinzas (%)			
Solventes (%)			< 20
Cloreto Total (Cl) (%)		< 5,0	
Fluoreto (F) (%)		< 15,0	
Brometo (Br) + Iodeto (I) (%)		< 0,5	
Enxofre (S) (%)		< 30,0	
Cianetos Totais (CN) (ppm)			< 250
PCBs (ppm)		< 50	
Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos – HAPs (ppm)- Soma			< 1000
Naftaleno (ppm)			< 10000
Acenaftileno (ppm)			< 1000
Acenafteno (ppm)			< 1000
Fluoreno (ppm)			< 1000
Fenantreno (ppm)			< 1000
Antraceno (ppm)			< 10000
Fluorentreno (ppm)			< 1000
Pireno (ppm)			< 1000
Benzo (a) antraceno (ppm)			< 1000
Criseno (ppm)			< 1000
Benzo (b) fluorentreno (ppm)			< 1000
Benzo (k) fluorentreno (ppm)			< 1000
Benzo (a) pireno (ppm)			< 1000
Indeno (1,2,3-CD) pireno (ppm)			< 1000
Dibenzo (a,h) antraceno (ppm)			< 1000
Benzo (g,h,i) perileno (ppm)			< 1000
Metais Pesados (ppm)			
Cadmio (Cd) (ppm)	< 100		
Mercúrio (Hg) (ppm)	< 10		
Tálio (Tl) (ppm)	< 100		
Soma Grupo I (Cd + Hg + Tl) (ppm)	≤ 100		
Arsênio (As) (ppm)		< 200	
Cobalto (Co) (ppm)	< 1500		
Níquel (Ni) (ppm)	< 1500		
Selênio (Se) (ppm)		< 50	
Telúrio (Te) (ppm)		< 50	
Soma Grupo II (As+ Co+ Ni+ Se+ Te) (ppm)	≤ 1500		
Cromo (Cr) (ppm)		< 1000	
Chumbo (Pb) (ppm)	≤ 5800		
Antimônio (Sb) (ppm)		< 350	
Estanho (Sn) (ppm)		< 1000	
Vanádio (V) (ppm)	≤ 5800		
Soma Grupo III (Cr+ Pb+ Sb+ Sn+ V) (ppm)	≤ 5800		