

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Eduardo Delano Leite Ribeiro

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE SISTEMAS DE
LIMPEZA DE GASES DE ALTO-FORNO EM
SIDERÚRGICAS NÃO-INTEGRADAS A CARVÃO
VEGETAL E ALTERNATIVA DE
REAPROVEITAMENTO DO PÓ DO BALÃO.

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral.
Orientador: Prof. Luiz Fernando Andrade de Castro.

Belo Horizonte
Escola de Engenharia
2011

R484e Ribeiro, Eduardo Delano Leite
Estudo comparativo entre sistemas de limpeza de gases de alto-forno em siderúrgicas não-integradas a carvão vegetal e alternativa de reaproveitamento do pó do balão [manuscrito] / Eduardo Delano Leite Ribeiro.— 2011.
78 f., enc. : il.

Orientador: Luiz Fernando Andrade de Castro.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 78-83.

1. Tecnologia mineral - Teses. 2. Altos-fornos - Limpeza – Aspectos ambientais - Teses.3. Metalurgia extrativa – Teses. I. Castro, Luiz Fernando Andrade de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.

CDU: 669.162.25 (043)

Ficha elaborada pelo Processamento Técnico da EEUFMG

EDUARDO DELANO LEITE RIBEIRO

Estudo comparativo entre sistemas de limpeza de gases de alto-forno em siderúrgicas não-integradas a carvão vegetal e alternativa de reaproveitamento do pó do balão

EDUARDO DELANO LEITE RIBEIRO

Tese apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, para a obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 26 de abril de 2011.

Prof. Dr. Antônio Eduardo Clark Peres
_____UFMG

Prof. Dr. Raul Zanoni Lopes Cançado
_____UFMG

Prof. Dr. Caetano Marciano de Souza
_____UFV

Prof. Dra. Fernanda Carla Wasner Vasconcelos
_____UNA

Prof. Dr. Luiz Fernando Andrade de Castro
UFMG
(Orientador)

BELO HORIZONTE
MINAS GERAIS – BRASIL

À minha esposa, Beth, aos
meus filhos Rafael,
Fernanda e Lucas
e ao meu neto Renzo.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e, em particular:

- A Deus, por permitir conquistar mais esta etapa.
- Ao Prof. Luiz Fernando Andrade de CASTRO, pela orientação, amizade e parceria em inúmeros trabalhos desenvolvidos.
- Aos Professores Antônio Eduardo, Raul Zanoni, Caetano Marciano e Fernanda Wasner, componentes da banca examinadora, pela disponibilidade e sugestões que permitiram melhorar este trabalho.
- A Universidade Federal de Minas Gerais, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, pela oportunidade de realização do curso.
- Ao Eng^o Bruno de Melo Lima, proprietário da Siderúrgica Metalsider Ltda., por seu incentivo e participação, permitindo a utilização de suas instalações como objeto de estudo bem como disponibilizar o material da pesquisa.
- Ao Eng^o Ricardo Zenóbio, pela participação, especialmente no acompanhamento do processo e valoroso companheiro nas inúmeras campanhas de coleta de dados nas chaminés.
- A Margarida, Flávia e Fernanda pela ajuda inestimável e apoio emocional.
- A Ildinha, Patricia, Cida e demais funcionários e professores do Dept^o de Metalurgia pelo carinho e horas agradáveis no café.

Sumário

	Página
Lista de figuras e gráficos	viii
Lista de tabelas.....	x
Lista de notações.....	xi
Resumo	xiii
Abstract.....	xv
Capítulo 1: Introdução	17
Capítulo 2: Objetivos	19
2.1 - Objetivo Geral	19
2.2 - Objetivos Específicos	19
Capítulo 3: Revisão da Literatura Geral	20
3.1. - Reator químico: O alto-forno	20
3.2 - O ferro-gusa.....	21
3.3 - Matérias-primas	22
3.3.1 - minério de Ferro	22
3.3.2 – Carvão vegetal: O redutor.....	24
3.3.3 - Fundente	26
3.4 – O processo produtivo	26
3.5 - Legislação ambiental aplicável ao setor.....	36
Capítulo 4: Estudo comparativo do sistema de limpeza do gás do alto-forno a seco <i>versus</i> a úmido	40
4.1 – Introdução	40
4.2 - Metodologia.....	47
4.2.1 – Caracterização do empreendimento estudado.....	47
4.2.2 – Condições de amostragem	51

4.3 – Resultados e Discussão	57
4.4 - Conclusão	65
Capítulo 5: Aproveitamento do resíduo pó do balão na indústria de cerâmica vermelha	66
5.1 – Introdução	66
5.1.1. - Matérias-primas da Indústria de Cerâmica Vermelha	67
5.2 – Metodologia	69
5.2.1. – Caracterização dos resíduos estudados	69
5.2.2. - Confeção do Molde.....	69
5.2.3. – Formulação da mistura.....	70
5.2.4. - Preparação dos corpos de prova	71
5.2.5. – Queima dos corpos de prova.....	72
5.3 – Resultados e Discussão	74
5.4 - Conclusão	77
Capítulo 6: Conclusões gerais.....	79
Capítulo 7: Contribuições originais ao conhecimento	80
Capítulo 8 - Relevância dos resultados	82
Capítulo 9: Sugestões para trabalhos futuros.....	83
Referências Bibliográficas	84

Lista de figuras e gráficos

	<i>Página</i>
FIGURA 01 – Esquema geral dos equipamentos para produção de Ferro-gusa.....	21
FIGURA 02 - Vazamento do gusa do alto-forno.....	22
FIGURA 03 – Esquema do preparo da carga sólida para introdução no alto-forno.....	28
FIGURA 04 – (a) Carregamento do alto-forno pelo skip; (b) alimentação do alto-forno com minério de Ferro.....	29
FIGURA 05 – Reações internas no alto-forno.....	30
FIGURA 06 – Injeção de ar quente no anel de vento do alto-forno.....	31
FIGURA 07 – Sistema de ventaneiras no alto-forno.....	32
FIGURA 08 – <i>Glendons</i> utilizados em alto-forno de carvão vegetal.....	33
FIGURA 09 – Uso do gás de alto-forno em usinas termelétricas.....	34
FIGURA 10 - Fluxo típico de matérias primas e produtos de um alto-forno a carvão vegetal.....	35
FIGURA 11 – Fluxograma geral típico do processo produtivo do ferro-gusa considerando aspectos ambientais e econômicos.....	36
FIGURA 12 - Detalhe do sistema de limpeza de gás de alto-forno destacando balão coletor e lavador de gás.....	43
FIGURA 13 - Chegada do gás do AF no balão gravitacional/coletor de pó.....	45
FIGURA 14 – Lavador de gás típico de baixa pressão.....	46
FIGURA 15 – Vista geral da Metalsider Ltda.....	49
FIGURA 16a e FIGURA 16B - Fluxograma do processo produtivo típico do ferro-gusa na Metalsider Ltda.....	50
FIGURA 17 - Situação de isocineticidade de coleta de material particulado.....	53
FIGURA 18 - (a) Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (CIPA); (b) painel de controle e bomba de vácuo (CIPA); (c) Identificação das partes do painel de controle e sistema de sucção.....	54
FIGURA 19 – (a) Detalhe da plataforma preparada para amostragem isocinética com utilização do CIPA; (b) detalhe da sonda do CIPA no interior da chaminé realizando uma amostragem isocinética.....	56
FIGURA 20 – Moldes de aço Carbono para confecção dos corpos de prova.....	71
FIGURA 21 - Corpos de prova (a) antes da queima (b) após a queima.....	73
FIGURA 22 - Ensaio de Lixiviação e Solubilização e Classificação dos Materiais.....	74

GRÁFICO 01 – Concentração de partículas no gás no AF – 01 (2002-2010).....	59
GRÁFICO 02 – Concentração de partículas no gás no AF – 02 (2002-2010).....	60
GRÁFICO 03 – Concentração de partículas no gás no AF – 03 (2003-2008).....	61
GRÁFICO 04 – Concentração de partículas no gás no AF – 04 (2002-2010).....	62
GRÁFICO 05 – Concentração de partículas no gás no AF – 05 (2002-2010).....	63
GRÁFICO 06 – Concentração de partículas no gás no AF – 06 (2004-2010).....	64
GRÁFICO 07 – Concentração de partículas no gás no AF – 07 (2003-2008).....	65
GRÁFICO 08 – Média das concentrações de MP em cada um dos altos-fornos.....	65

Lista de tabelas

	<i>Página</i>
Tabela 01 - Características do carvão vegetal e do coque.....	26
Tabela 02 - Comparação entre um alto-forno a carvão vegetal e a coque.....	26
Tabela 03 - Planilha para coleta de dados nos pontos pré-estabelecidos.....	54
Tabela 04 - Quantidade de cada componente presente nas misturas (100g).....	72
Tabela 05 - Ensaio para avaliar se os resíduos estudados pertencem à Classe I.....	75
Tabela 06 - Resultados dos ensaios realizados nos extratos lixiviados dos resíduos estudados.....	76
Tabela 07 - Resultados dos ensaios realizados nos extratos solubilizados dos resíduos estudados.....	77

Lista de notações

“	Polegada
%	Porcentagem
\geq	Maior ou igual a
<	Menor
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AF	Alto-forno
°C	Temperatura - graus Celsius
$\text{cm}^3.\text{m}^{-3}$	Unidade de volume - centímetros cúbicos por metro cúbico
CIPA	Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM	Conselho de Política Ambiental do Estado de Minas Gerais
COPASA	Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais
DN	Deliberação Normativa
DIMET	Divisão de Metalurgia da FEAM
FCO	Fundação Christiano Ottoni
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiental
FM	Filtro de Mangas
$\text{g}.\text{(Nm}^3\text{)}^{-1}$	Unidade de concentração - grama por Normal metro cúbico
h	Unidade de tempo – hora
ISO	International Standard Organization
$\text{kcal}.\text{(Nm}^3\text{)}^{-1}$	Poder calorífico – quilocaloria por Normal metro cúbico
kg	Unidade de massa – quilogramas
$\text{kg}.\text{cm}^{-2}$	Unidade de resistência – quilograma por centímetro quadrado
$\text{kg}.\text{cm}^{-3}$	Densidade – quilograma por centímetro cúbico
$\text{kg}.\text{t}^{-1}$	Concentração massa por massa - quilograma por tonelada
$\text{kgf}.\text{cm}^{-2}$	Unidade de pressão - Quilograma força por centímetro quadrado
$\text{L}.\text{s}^{-1}$	Unidade de vazão – Litros por segundo

m	Unidade de comprimento – metro
m.s ⁻¹	Unidade de velocidade - metros por segundo
m ²	Unidade de área – metro quadrado
m ³ .h ⁻¹	Unidade de vazão – metro cúbico por hora
mg.(Nm ³) ⁻¹	Unidade de concentração - Miligrama por Normal metro cúbico
mL	Unidade de volume – mililitros
mm	Unidade de comprimento – milímetro
mmca	Unidade de pressão – milímetros de coluna de água
mmH ₂ O	Unidade de pressão - milímetro de água
mmHg	Unidade de pressão – milímetro de mercúrio
MP	Material particulado
Mt	Milhões de tonelada
MME	Ministério das Minas e Energia
MW	Megawatt
MWh	Megawatt hora
µm	Micrometro
NBR	Norma Brasileira
Nm ³	Normal metro cúbico
pH	Potencial hidrogeniônico
RPM	Rotações por minuto
SINDIFER	Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais
t	Unidade de massa – tonelada
t.ano ⁻¹	Unidade de produção – tonelada por ano
t.dia ⁻¹	Unidade de produção – tonelada por dia
t.dm ⁻³	Unidade de produção – tonelada por decímetro cúbico

Resumo

A indústria siderúrgica não-integrada á carvão vegetal tem sua predominância no estado de Minas Gerais, concentrando 106 altos-fornos, com capacidade de produção de cerca de 5.500.000t.ano⁻¹.

No ano de 2001, foi promulgada pela COPAM - Conselho de Política Ambiental do Estado de Minas Gerais, a Deliberação Normativa DN n°49/2011 que possibilitou a regularização ambiental do setor e criou mecanismos de controle. Após oito anos em vigor, foram realizadas duas dissertações de mestrado por técnicos do órgão ambiental objetivando atualizar dados, propor indicadores de performance ambiental, além de pesquisar sobre aproveitamento energético do gás de alto-forno.

Ênfase foi dada a questão de emissões atmosféricas notadamente ao sistema de limpeza de gás do alto-forno. Segundo dados levantados nos referidos estudos, o sistema de limpeza de gases realizado a úmido, com implantação de lavadores de gases, apresentava a mesma eficiência do sistema de limpeza a seco, via coletores inerciais e ciclones conforme resultados apresentados no programa de auto-monitoramento enviado ao órgão ambiental pelas unidades do setor.

Em face de inconsistência dos dados dos monitoramentos referidos, foi proposto então um estudo através de amostragens isocinéticas objetivando determinar a concentração de material particulado emitido pelos sete altos-fornos da siderúrgica Metalsider Ltda.. As amostragens foram realizadas com os altos-fornos operando com o sistema a seco, balões coletores e, posteriormente, com sua substituição por lavadores de gases. As mudanças de sistema de limpeza foram realizadas paulatinamente à medida que os fornos atingiam seu final de campanha.

Os resultados obtidos demonstraram que o sistema a úmido, adotando lavadores de gases tipo Venturi, apresentaram maior eficiência de remoção de material particulado indicando ser o equipamento mais adequado para limpeza dos gases nos altos-fornos, visando principalmente o seu aproveitamento energético.

Uma alternativa de utilização do pó do balão recolhido no coletor primário, do sistema de limpeza dos gases, foi estudada com objetivo de avaliar o percentual de adição de 3% do resíduo na argila, para fabricação de tijolos. O resultado obtido indicou que a adição do pó do balão, nesta proporção, não altera a classificação da argila garantindo a inertização dos eventuais metais pesados presentes no resíduo. Em face destes resultados, sugere-se, a criação de uma Deliberação Normativa específica sobre a possibilidade de reaproveitamento deste material visto que nesta porcentagem de aproveitamento, a argila não tem sua classificação alterada conforme a ABNT NBR 10.004.

Abstract

The non-integrated steel industry charcoal has predominance in Minas Gerais, concentrating 106 blast furnaces with a production capacity of approximately 5.500.000t.ano⁻¹.

In 2001, was enacted by COPAM - the Regulatory Determination nº49/2011 allowed the environmental regulation of the sector and established mechanisms of control. After eight years in the force were held two master's theses by experts from the environmental agency to updating data, to propose environmental performance indicators, and research on energy use of blast furnace gas.

Emphasis was given to the subject of atmospheric notably the cleaning system of blast furnace gas. According to data collected in these studies, the system of gas cleaning done wet, with implementation of scrubbers, showed the same efficiency of dry cleaning, via inertial collectors and cyclones according to results presented in self-monitoring program sent the environmental agency for the sector units.

In the face of inconsistency of data from such monitoring, then a study was proposed by isokinetic sampling aiming to determine the concentration of particulate matter emitted by seven blast furnaces of steel Metalsider Ltda.. Samples were taken at the blast furnaces operating with the system dry, dust collectors and, later, its replacement with gas scrubbers. The cleaning system changes were made gradually as the oven reaches its final campaign. The results show that the wet system, adopting scrubbers, Venturi had higher removal efficiency of particulates indicating that the most appropriate equipment to clean the gas in blast furnaces, mainly targeting the gas energy.

The alternative of using the powder collected in the primary dust collector, the gas cleaning system was studied to evaluate the rate of addition of 3% of the residue on clay for making bricks. The result indicated that the addition of powder flask in this ratio does not change the classification of clay blanketing guaranteeing of any heavy metals present in the residue. These results is strongly suggested the creation of a specific

Regulatory Determination on the possibility of reuse of this material since this percentage of recovery, the waste has not changed its classification according to ABNT NBR 10.004.

Capítulo 1: Introdução

O Estado de Minas Gerais é o maior produtor de ferro-gusa do Brasil. Em 2010, contava com 63 produtores sendo, 29 na região Centro Oeste, 27 na região Nordeste e sete na região metalúrgica do Estado com 106 fornos implantados, com capacidade instalada de 8.426.760ton.ano⁻¹. A produção independente de ferro-gusa, em 2010, foi de 3.091.920ton.ano⁻¹ com 46 altos-fornos paralisados (informação verbal)¹. A partir de 2008, devido à crise mundial, o setor sofreu redução de produção, com paralisação de empresas. Apesar dos 106 altos-fornos existentes, a produção reduziu para 4.383 mil toneladas (BRASIL, 2010).

A produção do ferro-gusa ocorre a partir da redução do minério de ferro em alto-forno de siderúrgicas não-integradas sendo que este produto pode ser destinado às aciarias ou às fundições. Segundo BRASIL (2009), em 2007, 39% do ferro-gusa produzido em Minas Gerais foi consumido pelo mercado interno e a maioria da produção (61%) foi exportada. Verificou-se que o principal destino do ferro-gusa brasileiro são os Estados Unidos (59,6%), Taiwan (7,6%), Tailândia (5,5%), Espanha (4,2%), Coréia do Sul (3,4%), Austrália (2,6%) e 17,1% em outros países (BRASIL, 2010).

Apesar da contribuição da siderurgia a carvão vegetal para a economia do Estado, constata-se a geração de impactos ambientais nos processos envolvidos, necessitando de adequação ambiental principalmente relacionado ao controle das emissões atmosféricas dos altos-fornos e à reutilização dos resíduos sólidos industriais gerados no sistema de limpeza dos gases dos altos-fornos. Devido à pressão dos órgãos ambientais, da sociedade civil e dos importadores deste produto, faz-se necessária a constituição de um sistema sustentável ambientalmente visando aspectos tecnológicos objetivando maior competitividade de mercado.

¹ Informe repassado pelo Sindifer, com base na estimativa de produção referente ao ano de 2010, obtida em fevereiro de 2011.

Com objetivo de fornecer uma visão atualizada da siderurgia a carvão vegetal, a presente tese visa preencher a lacuna existente no conhecimento produzido na década de 90 que viabilizou a promulgação da DN COPAM nº49/2001, específica para o setor de ferro-gusa. Esta Deliberação se refere a emissões atmosféricas e ao reaproveitamento de resíduos sólidos gerados no sistema de limpeza dos gases. Em 2006, com o objetivo de verificar o desempenho ambiental do setor, através de coletas de informações específicas, foi realizado um convênio entre a FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente e a Fundação Christiano Ottoni (Escola de Engenharia). Foi elaborada uma lista mestra de informações aplicadas a este setor pelos professores Luiz Fernando Andrade de Castro e Eduardo Delano Leite Ribeiro, em visitas às indústrias envolvidas. Acrescentam-se as recentes pesquisas de BATISTA (2009) e MALARD (2009), ambos técnicos do órgão ambiental, que abordaram aspectos do controle ambiental previsto na DN COPAM nº49/2001. BATISTA (2009) discorre sobre o potencial energético relacionando ao sistema de limpeza de gases. MALARD (2009) aborda aspectos relativos ao comprimento do disposto na Deliberação nº49/2001 e propõe a criação de um índice de desempenho ambiental para cada empreendimento.

Associando a experiência destes dois autores e dos colaboradores deste grupo de pesquisa por mais de vinte anos atuando no setor de forma independente e, através do Projeto Minas Ambiente aliado aos estudos de BATISTA (2009) e MALARD (2009), foi elaborado um programa de atividades, visando suprir a carência de dados e informações, que não foram concretizados pelos estudos mencionados.

Por se tratar de temáticas distintas com metodologias específicas, elaborou-se esta tese em capítulos semelhantes a artigos referentes ao controle de poluição atmosférica do efluente gasoso do alto-forno e da reutilização do resíduo sólido gerado no processo de limpeza dos gases.

Salienta-se que a siderurgia a carvão vegetal é uma atividade desenvolvida basicamente no Brasil, com tecnologia nacional e adotando técnicas ambientais comparadas à siderurgia de primeiro mundo, no entanto, carente de material didático a nível internacional para consulta, face ao tema exclusivamente nacional.

Capítulo 2: Objetivos

2.1 - Objetivo Geral

- Avaliar as técnicas disponíveis de controle ambiental do setor de ferro-gusa em consonância com a legislação vigente, aprimorando o gerenciamento ambiental neste setor.

2.2 - Objetivos Específicos

- Comparar a eficiência dos sistemas de limpeza de gases a seco e a úmido através da determinação da concentração de material particulado emitido por fontes estacionárias através de amostragem isocinética.
- Verificar o aproveitamento potencial do pó do balão proveniente do sistema de limpeza dos gases na fabricação de produtos de cerâmica vermelha.

Capítulo 3: Revisão da Literatura Geral

3.1. - Reator químico: O alto-forno

O alto-forno é um reator metalúrgico destinado à produção de ferro-gusa, através da fusão redutora de minério de Ferro em presença de carvão vegetal ou coque e fundentes. Segundo CASTRO (1988), a utilização de carvão vegetal em altos-fornos de grande porte é inviável devido à sua pequena resistência mecânica, estando sua máxima produção girando em torno de 1.200t.dia^{-1} . Normalmente, no Brasil, os mini altos-fornos a carvão vegetal, utilizados pelas usinas não-integradas (**FIG. 01**), apresentam uma capacidade de produção que varia entre 40 e 300t.dia^{-1} de Ferro-gusa.

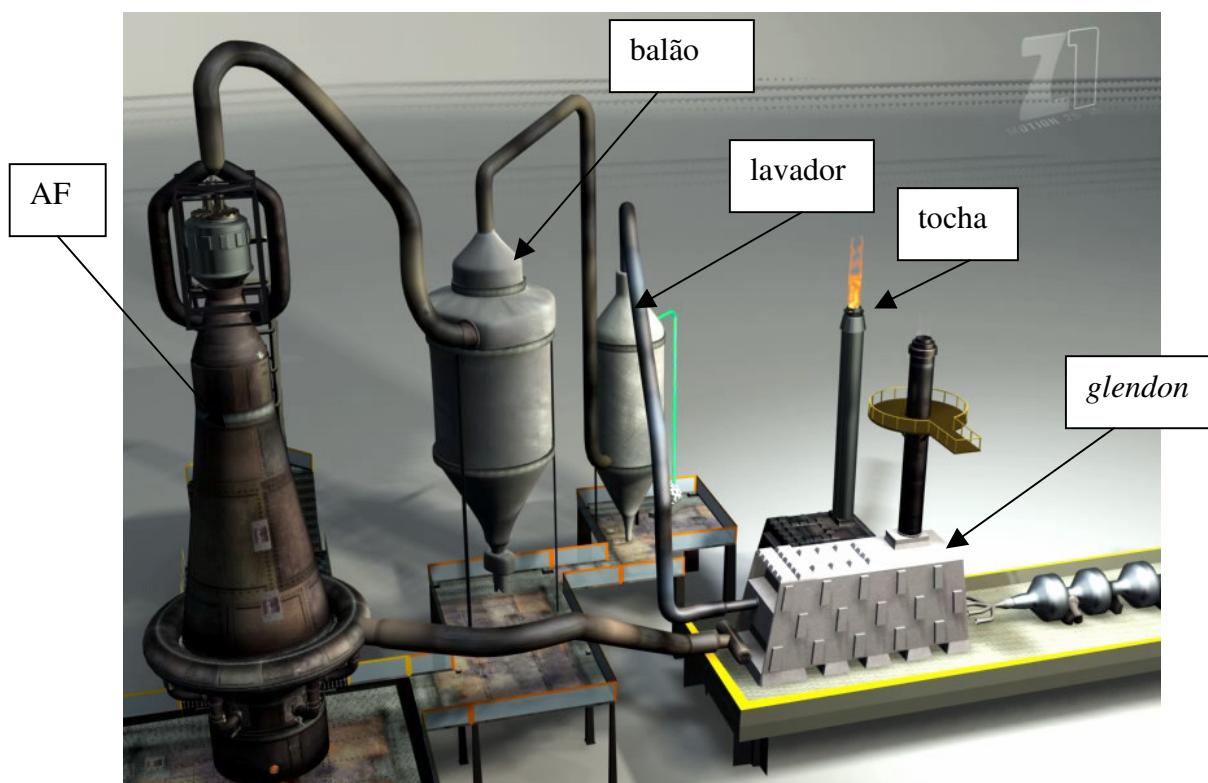


FIGURA 01 – Esquema geral dos equipamentos para produção de ferro-gusa.
Fonte: Metalsider Ltda/ Z1 Motion, 2010.

Conforme BATISTA (2009), os altos-fornos operando com coque apresentam uma capacidade de produção de cerca de 3.500 a 13.000t.dia^{-1} e são utilizados em usinas

integradas. Existem situações em que os grandes altos-fornos (capacidade maior que 1000t.dia^{-1}) a carvão vegetal podem sofrer adaptações para operar com uma carga predominante de coque, em função de vantagens econômicas momentâneas. De maneira geral, o alto-forno é constituído pelos equipamentos de descarga e pesagem de matérias-primas; equipamentos de carga no topo do forno; o forno propriamente dito; equipamentos para operação de alta pressão; regeneradores de calor (*glendons*).

3.2 - O ferro-gusa

O produto metálico obtido do processo do alto-forno é o gusa líquido constituído de Ferro (aproximadamente 94%), Carbono (em torno de 4%) e outros elementos como Silício, Manganês, Fósforo e Enxofre cujo vazamento no alto-forno está apresentado na **FIG. 02**.

Nesses processos, obtém-se ainda outro produto líquido conhecido como escória. Ela é formada pela ganga do minério (SiO_2 e Al_2O_3), pelos fundentes (CaO e MgO) e pelas cinzas do coque ou do carvão. Como sua densidade é mais baixa comparada a do gusa líquido, um processo físico é capaz de separá-los (CASTRO, 1998).

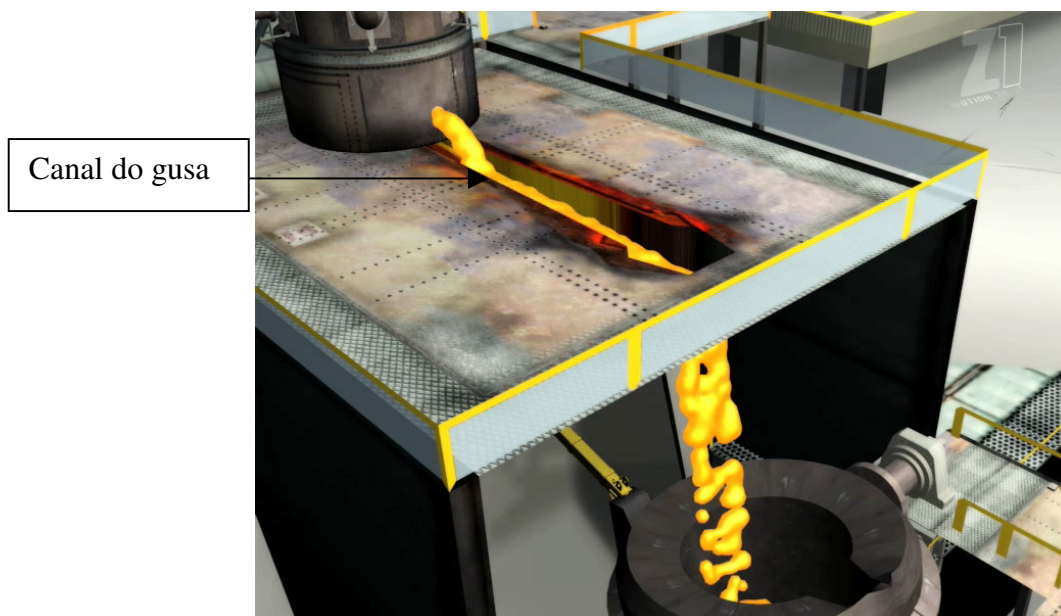


FIGURA 02 - Vazamento do gusa do alto-forno.
Fonte: Metalsider Ltda/ Z1 Motion, 2010.

3.3 - Matérias-primas

Para produção do ferro-gusa em alto-forno são necessárias duas matérias-primas básicas: o minério de ferro e o carvão vegetal. Além destas são utilizados fundentes (Quartzo, Calcário, Dolomita, etc.) e sucata.

3.3.1 - Minério de Ferro

O Ferro é encontrado na natureza associado ao Oxigênio e à Sílica, sendo o quarto elemento mais abundante (5,01%). O minério de ferro, um óxido de ferro misturado com sílica, é a matéria-prima mais importante na siderurgia, pois é dele que se extrai o Ferro. Segundo BATISTA (2009), os minerais que contêm Ferro significativamente são os óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos, sendo os óxidos os mais importantes para a siderurgia.

Os principais minérios de Ferro são a Hematita (Fe_2O_3), tipo mais comum, a Magnetita (Fe_3O_4), a Goethita ($\text{FeO}\cdot\text{OH}$), a Pirita (FeS_2), a Siderita (FeCO_3) e a Ilmenita (FeTiO_2).

Normalmente, as especificações químicas e físicas de matérias-primas, granulados e aglomerados, para a siderurgia são rigorosas, sendo exigidos produtos com elevado teor de Ferro, acima de 64% e baixo teor de impurezas, principalmente: P, SiO_2 , Al_2O_3 , S, e álcalis (K_2O e Na_2O) que influenciam na qualidade do aço e ou ferro fundido (VASCONCELOS, 2011).

Antes de ser enforado, o minério de ferro é beneficiado. O termo genérico “beneficiamento” compreende uma série de operações que têm como objetivo tornar o minério mais adequado para a utilização nos altos-fornos. Estas operações são o peneiramento, classificação, pesagem e secagem.

Segundo SANTOS (2007), para ser utilizado no alto-forno, o minério deve ter composição química de no mínimo 65% de Ferro e granulometria de 8 a 25mm. O menor tamanho do minério melhora sua redutibilidade, porém, quando uma grande

quantidade de finos é carregada no alto-forno, a permeabilidade torna-se baixa, prejudicando o processo. Portanto, o minério deve ter um tamanho máximo em termos de redutibilidade e um tamanho mínimo em termos de permeabilidade. Além disso, deve ser resistente à degradação pelo manuseio e apresentar baixa crepitação, que é a tendência dos minérios de produzir finos quando submetidos ao aquecimento.

A secagem do minério de ferro implica no aumento da eficiência de peneiramento permitindo que os finos soltem da superfície das partículas do minério, necessitando de equipamento de desempoeiramento. No Estado de Minas Gerais, 50 unidades de siderurgia não-integrada a carvão vegetal realizam esta operação, ou seja, 74% (MALARD, 2009).

Os altos-fornos a coque, por apresentarem maior volume, são mais exigentes em relação à qualidade da carga metálica. É indispensável, para o bom andamento do processo, que um alto-forno a coque de grande porte utilize uma carga metálica preparada (sínter e ou, pelota).

Já os altos-fornos a carvão vegetal trabalham com boa eficiência, mesmo utilizando somente minério de ferro granulado. A utilização do sínter ou das pelotas visa melhorar a permeabilidade da carga do alto-forno, reduzir o consumo de carvão e acelerar o processo de redução. Entretanto, as siderúrgicas não-integradas a carvão vegetal, em geral, não os usam devido exclusivamente aos fatores econômicos.

Conforme JACOMINO ET AL. (2002a), cada tonelada de ferro-gusa produzida gera o consumo específico de 1480 a 1790kg.t⁻¹ de minério. Em consulta aos processos de licenciamento ambiental em Minas Gerais, foi verificado uma média de 1650kg.t⁻¹ de gusa (MALARD, 2009).

3.3.2 – Carvão vegetal: O redutor

O combustível utilizado no alto-forno é o carvão vegetal ou coque, que têm como objetivos fornecer calor para a combustão, fornecer Carbono para a redução de óxido de ferro e indiretamente, fornecer Carbono como principal elemento de liga do ferro-gusa.

O Brasil possui todas as condições para produzir biomassa florestal em grande escala, por estar situado na zona intertropical do planeta, possuir extensão territorial que possibilita não competir com culturas alimentares, possuir uma das maiores taxas de insolação com regiões extensas e regime de chuvas mais do que satisfatórios para cultura de florestas para uso energético além de possuir reservas de calcário, fosfatos e outros minerais que, bem utilizados, são capazes de sustentar plantios extensivos da biomassa florestal.

A opção pelo carvão vegetal ou coque como combustível em alto-forno não modifica os fundamentos do processo de produção do ferro-gusa. Entretanto, utilizando-se carvão vegetal tem-se uma operação mais complexa e sujeita a maiores transtornos, devido à variação de suas propriedades, em função do tipo de madeira, da idade e das variáveis do processo de carbonização. Já o coque permite obter uma maior estabilidade de suas características.

Tanto o carvão vegetal quanto o coque são fontes de Carbono, entretanto existem diferenças básicas entre os processos, como por exemplo, a origem do carvão vegetal e do coque. O primeiro é proveniente da carbonização da madeira com um teor de Carbono fixo entre 56% e 75%, enquanto o segundo é proveniente do carvão mineral com teor de Carbono fixo em torno de 88% (JACOMINO ET AL., 2002a).

As diferenças entre as propriedades do carvão vegetal e do coque, conforme apresentado na **TAB. 01**, fazem com que os altos-fornos também tenham as suas diferenças, como o tamanho. O uso do carvão vegetal limita o tamanho do forno porque este produto não suporta altas pressões de carga. Altos-fornos de grande porte utilizam coque como redutor, enquanto altos-fornos, que produzem no máximo em torno de

1.200 toneladas de ferro-gusa por dia, podem utilizar carvão vegetal (JACOMINO ET AL., 2002a).

Tabela 01

Características do carvão vegetal e do coque.

Item	Unidade	Carvão vegetal	Coque
Carbono fixo	%	65-75	~88
Materiais voláteis	%	25-35	~1
Cinza	%	2-5	10-12
Enxofre	%	0,03-0,10	0,45-0,70
Resistência à compressão	kg.cm ⁻²	10-80	130-160
Faixa granulométrica	mm	9-100	25-75
Densidade	kg.cm ⁻³	180-350	550
Reatividade	-----	Maior	Menor

Fonte: Adaptado de JACOMINO ET AL., 2002a.

Como a DN n°49/2001, em seu artigo 12 permite a substituição de carvão vegetal por até 20% de coque, a **TAB. 02** apresenta as diferenças de características entre alto-forno a carvão vegetal e a coque.

Tabela 02

Comparação entre um alto-forno a carvão vegetal e a coque.

Parâmetro	Coque	Carvão vegetal
Produção	2.000 a 12.000t.dia ⁻¹	20 a 1.200t.dia ⁻¹
Diâmetro cadinho	8 a 14m	1,5 a 6m
Altura alto-forno	~32m	~16m
Regeneradores	<i>Cowpers</i>	<i>Cowpers e glendons</i>
Produtividade	>2t.dm ⁻³	1,6 a 2t.dm ⁻³
Volume escória	250 a 300kg.t ⁻¹ gusa	100 a 150kg.t ⁻¹ gusa
Gusa	Enxofre alto	Fósforo alto
Carga metálica	Presença de sinter e/ou pelota	Pode ser 100% de minério granulado

Fonte: Adaptado de JACOMINO ET AL., 2002a.

Assim como o minério de ferro, o carvão vegetal é também preparado antes de ser enfiado. Ao chegar à siderúrgica, o carvão vegetal passa por uma peneira de 3/8", visando o acerto da quantidade comprada. Em seguida, é estocado em silos fechados ou

encaminhado para o sistema de descarga direta no alto-forno, sendo que antes de ser enornado passa ainda por uma peneira visando eliminar os finos.

3.3.3 - Fundente

O fundente é o material que auxilia a formação de escória. O principal fundente é o calcário (CaCO_3), uma rocha constituída por carbonato de cálcio.

Outra atuação do fundente é combinar-se com as impurezas (ganga) do minério de ferro e com as cinzas do carvão, formando a escória. As impurezas do minério de ferro, como a Sílica (SiO_2) e a Alumina (Al_2O_3), que apresentam elevado ponto de fusão, necessitam da utilização dos fundentes, visando tornar essas substâncias mais fusíveis.

Conforme a MINITEC (2005), para cada tonelada de ferro-gusa produzida são utilizados em média 65kg de calcário e 35kg de dolomita.

3.4 – O processo produtivo

A carga sólida é constituída de combustíveis/redutores, minério de ferro e fundentes (**FIG. 03**), que são carregados para o topo do alto-forno através de *skips* e, ou, correias transportadoras, após balanças e peneiras vibratórias. O sistema de carregamento do alto-forno é fundamental na distribuição desta carga que exerce influência em sua operação, uma vez que ela constitui um dos fatores determinantes da eficiência das trocas térmicas e das reações de redução, além de afetar diretamente no formato e na posição da carga térmica sobre a parede do forno.



FIGURA 03 – Esquema do preparo da carga sólida para introdução no alto-forno.
Fonte: Metalsider Ltda/Z1 Motion,2010.

Os equipamentos de carga do topo do alto-forno (**FIG. 04**) têm por função distribuir a matéria-prima no interior do forno ao longo do diâmetro da garganta e vedam o gás, evitando o vazamento e a perda de pressão. Existem dois sistemas usuais de distribuição de carga adotados em altos-fornos: o sistema duplo cone geralmente utilizado em fornos menores, e o sistema topo sem cone (*Paul Wurth* ou *Bell less*) que utiliza tremonhas de carregamento com calha rotativa, em fornos de grande porte.

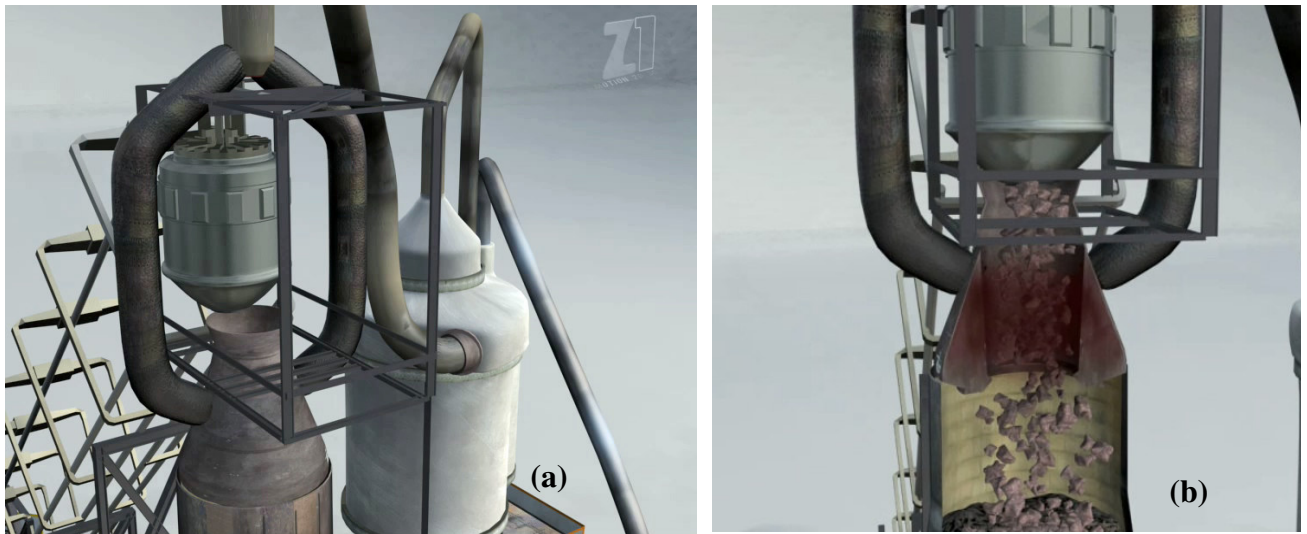


FIGURA 04 – (a) Carregamento do alto-forno pelo skip; (b) alimentação do alto-forno com minério de ferro.

Fonte: Metalsider Ltda/Z1 Motion, 2010.

O correto funcionamento do sistema de carregamento e sua adequada vedação são fundamentais para aumentar a pressão de topo dos altos-fornos, existindo ainda sistemas simples para compensar uma eventual pressão de topo excessiva (principalmente quando se utilizam Venturis com garganta móvel na limpeza do gás que exercem contra-pressão), implantando mecanismos de despressurização.

O alto-forno pode ser dividido em zona de pré-aquecimento, zona de redução (ou de reserva térmica) e zona de elaboração de acordo com o seu perfil térmico. Na **FIG. 05**, estão representadas as principais reações químicas que ocorrem em cada zona térmica do alto-forno.

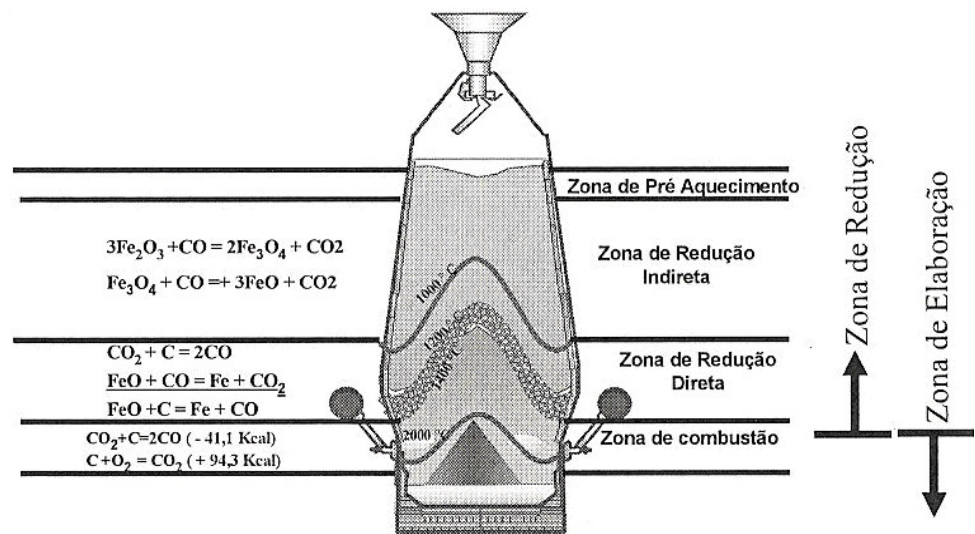


FIGURA 05 – Reações internas no alto-forno.

Fonte: BATISTA, 2009.

No alto-forno, o oxigênio do ar pré-aquecido é injetado na parte inferior (**FIG. 06**) para que ocorra a combustão do carbono-redutor seja carvão vegetal seja coque que ao serem queimados, geram gases redutores em alta temperatura que reagem com o oxigênio combinado ao ferro do minério. O processo de redução é acompanhado por outras reações químicas como a formação de carbonetos e a fusão da ganga e dos fundentes para constituição da escória, que é vazada do forno para as casas de corrida (ARAÚJO, 1996).

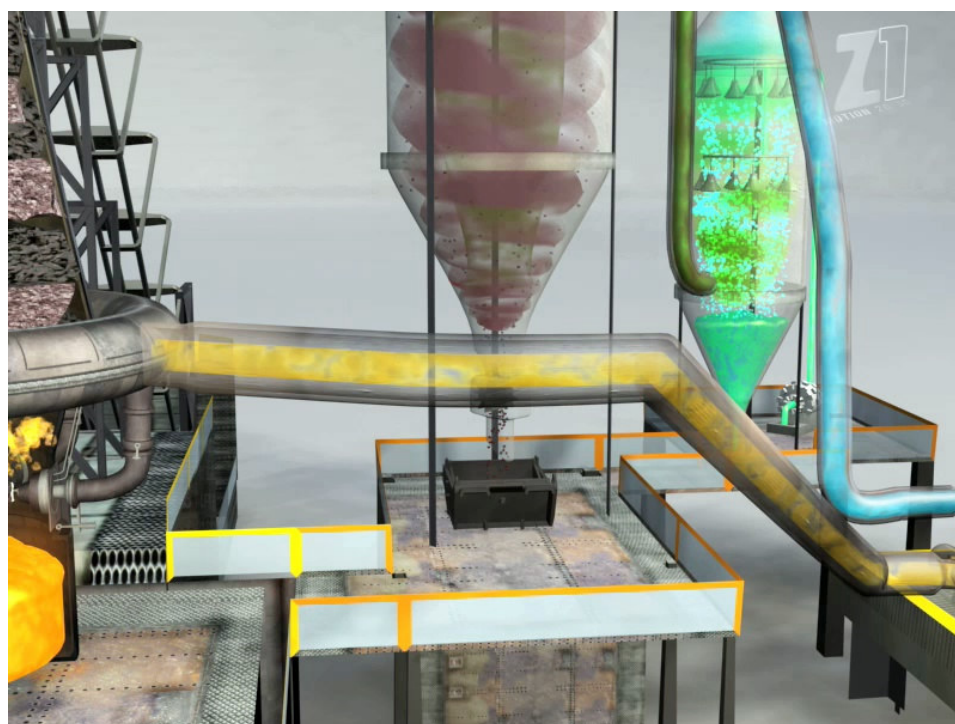


FIGURA 06 – Injeção de ar quente no anel de vento do alto-forno.
Fonte: Metalsider Ltda/Z1 Motion, 2010.

O gás gerado no alto-forno é constituído por 19 a 30% de Monóxido de Carbono (CO), 14 a 18% de dióxido de carbono (CO₂), 3 a 7% de Hidrogênio (H₂) e, aproximadamente, 1% de metano (CH₄) com poder calorífico de 700 a 900kcal.(Nm³)⁻¹ (JACOMINO ET AL., 2002a).

Segundo BATISTA (2009), o gás do alto-forno, após passar pelo processo de limpeza, é queimado nos *glendons* visando aquecer o ar atmosférico a cerca de 1300°C e é injetado no alto-forno pelas ventaneiras (**FIG. 07**) com velocidade que pode variar de 180 a 280m.s⁻¹.



FIGURA 07 – Sistema de ventaneiras no alto-forno.
Fonte: Metalsider Ltda/Z1 Motion, 2010.

Diferentemente dos *cowpers*, os *glendons* operam continuamente e independem de outras unidades para efetivar este processo. O ar frio atravessa uma câmara de combustão através de uma serpentina feita de garrafas de Ferro fundido ou aço inoxidável por onde troca calor com os gases da queima que ficam na parte externa das garrafas, conforme mostrado na **FIG. 08**. Posteriormente, este ar é enviado ao anel de vento que é uma construção tubular que envolve o alto-forno na altura da rampa e, em seguida, para as ventaneiras do alto-forno (JACOMINO ET AL., 2002a).

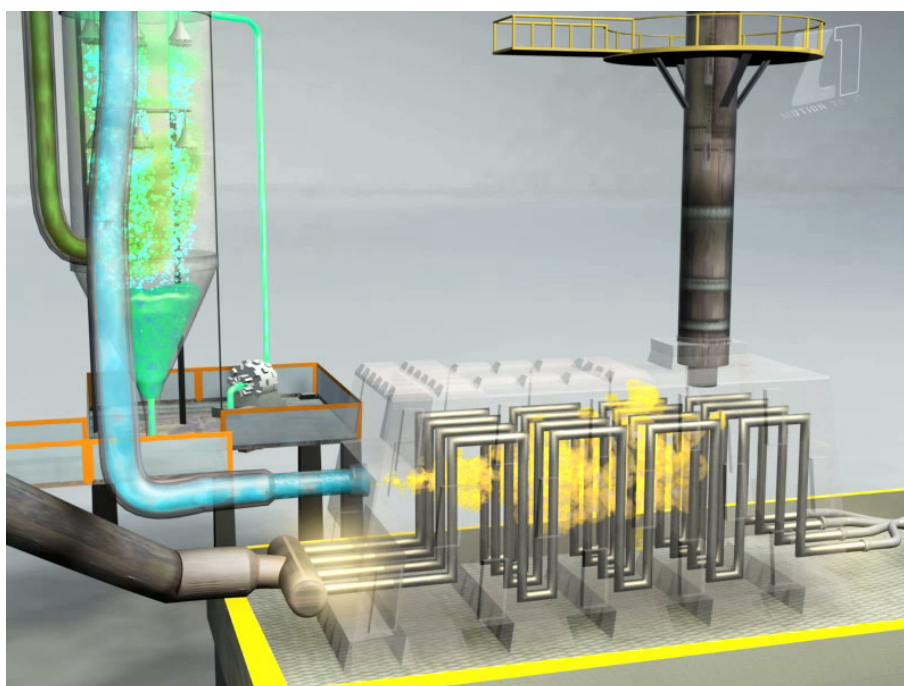


FIGURA 08 – *Glendons* utilizados em alto-forno de carvão vegetal.
Fonte: Metalsider Ltda/Z1 Motion, 2010.

Os gases de alto-forno não aproveitados nos *glendons* ou *cowpers* são queimados em tochas, observando uma tendência da utilização desses gases para geração de energia elétrica em termoelétricas (**FIG. 09**) cuja produção atual em Minas Gerais é de aproximadamente 36,2MWh (BATISTA, 2009). Assim, a análise de viabilidade do aproveitamento energético do gás de alto-forno para geração de energia elétrica é diferenciada e deve considerar as variações existentes nas pressões de topo, nas vazões e na concentração de material particulado e nos gases emitidos pela chaminé do *glendon*.

BATISTA (2009) ressalta que não há uma relação muito clara entre pressão de topo, vazão do gás e concentração do material particulado neste gás para os altos-fornos a carvão vegetal e salienta que o gás deve ser puro. Além disso, afirma que o gás de alto-forno, após passar pela turbina de recuperação de topo para gerar energia elétrica, pode ter seu poder calorífico ainda aproveitado pela usina ao ser misturado com outros gases no balão.

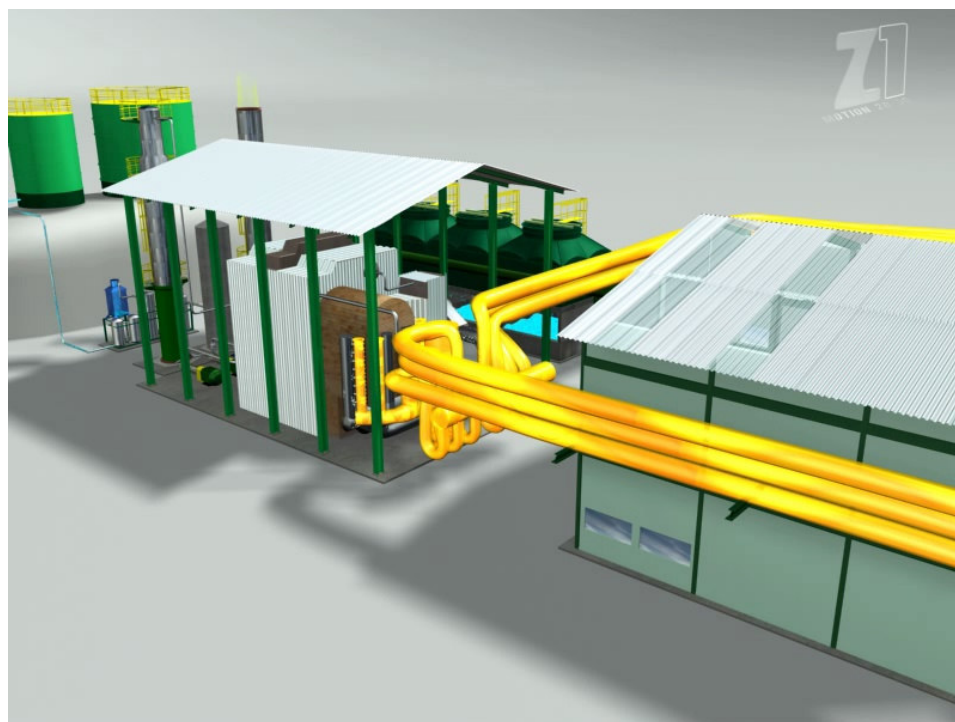


FIGURA 09 – Uso do gás de alto-forno em usinas termelétricas.
Fonte: Metalsider Ltda/Z1 Motion, 2010.

Uma vez iniciada a operação de um alto-forno, ela deve ser mantida praticamente ininterrupta por vários anos. A campanha para a troca de seu revestimento refratário é realizada após períodos de doze a quatorze anos de funcionamento, observando-se que existem altos-fornos com funcionamento superior a 20 anos ininterruptos.

A **FIG. 10** representa o fluxo de matéria prima e produtos, suprimentos para produção de Ferro-gusa.

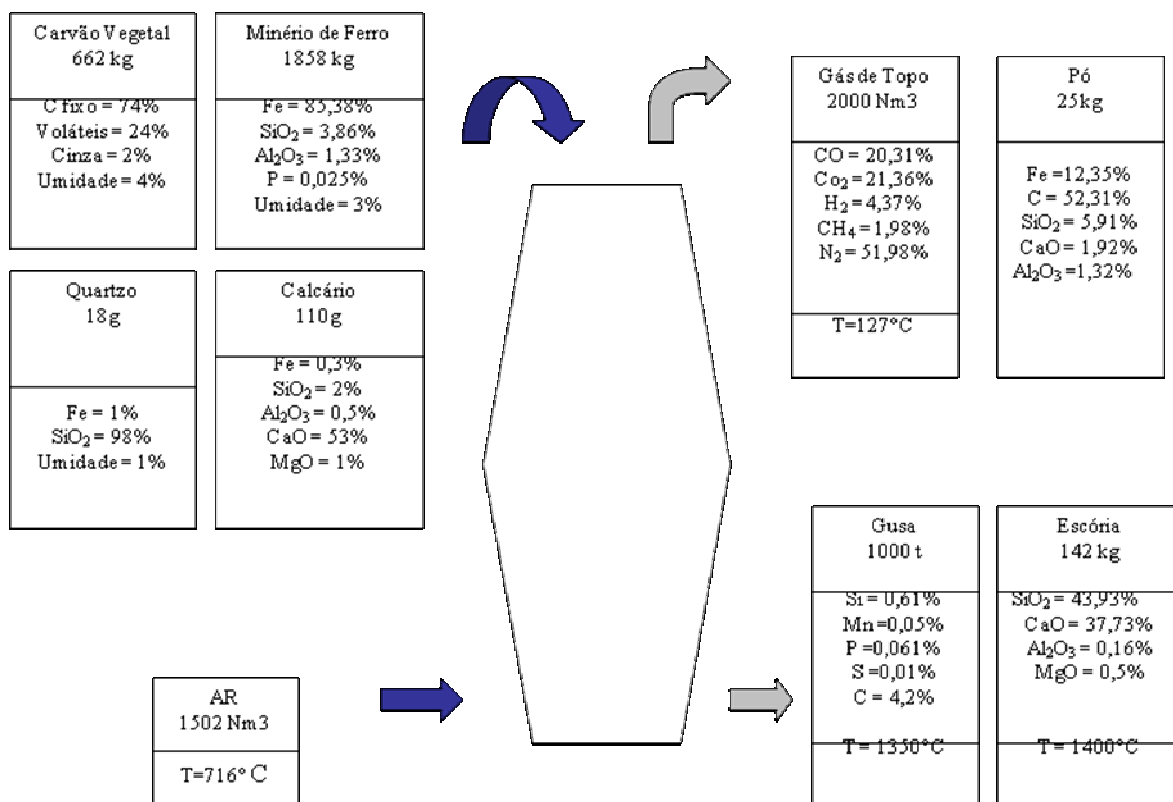


FIGURA 10 - Fluxo típico de matérias primas e produtos de um alto-forno a carvão vegetal.

Fonte: JACOMINO ET AL., 2000.

De acordo com estudos de CASTRO (1998), a fabricação do ferro-gusa provoca impactos ambientais (**FIG. 11**), tais como: efluentes líquidos do processo de refrigeração, da lavagem de gases e do resfriamento da escória e, ou, da granulação (RIBEIRO et al., 1999; RIBEIRO et al., 2005) que devem ser totalmente recirculados segundo a DN COPAM nº49/2001.

Estes impactos ambientais apontados podem ser minimizados em sua geração ao utilizar procedimentos técnicos adequados na operação do alto-forno a carvão vegetal reduzindo a carga de poluentes, conforme proposta de CASTRO et al. (2001) e, que posteriormente foi aprimorada pelo Projeto Minas Ambiente (JACOMINO ET AL., 2002a), bem como a aplicação da legislação vigente específica para o setor (COPAM, 2001).

A FIG. 11 apresenta um fluxograma típico da produção de ferro-gusa, destacando os aspectos ambientais e econômicos deste processo produtivo.

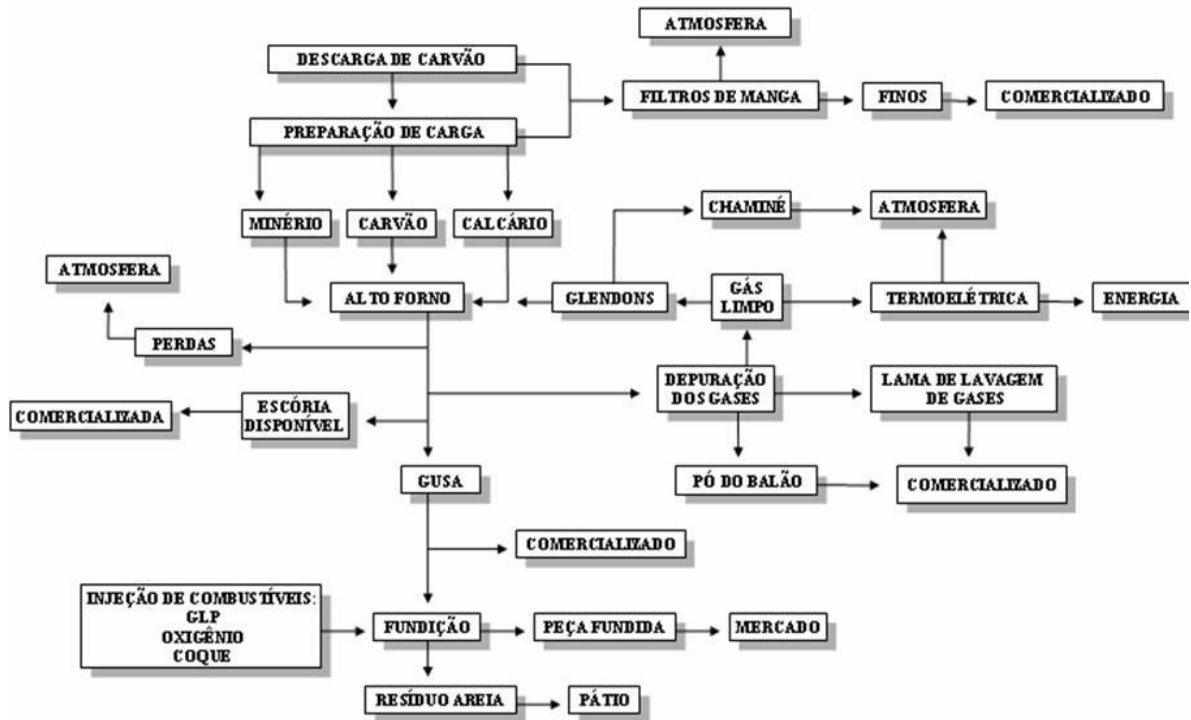


FIGURA 11 – Fluxograma geral típico do processo produtivo do ferro-gusa considerando aspectos ambientais e econômicos.
Fonte: Próprio autor.

Alternativas tecnológicas para a reutilização e ou reciclagem dos resíduos sólidos gerados foram pesquisadas, visando minimizar impactos no ambiente, tais como: o diagnóstico do gerenciamento dos resíduos sólidos gerados em unidades independentes de produção de Ferro-gusa (JACOMINO ET AL., 1999), o aproveitamento deste material gerado pelas siderúrgicas não-integradas a carvão vegetal em Sete Lagoas (MALARD, 2008; 2009), utilização da escória de alto-forno para pavimentação de estradas (GEYER et al., 1994; CASTRO et al., 2002a) e utilização da escória em cimenteiras (BATTAGIN, 1998; BENQUERER, 2000; ALMEIDA, 2001) ou para uso agrícola (CASTRO et al., 2002c; SOUZA et al., 2003a; SOUZA et al., 2003b; ALCARDE, 2005; SOUZA et al., 2006).

Já os estudos de JACOMINO ET AL. (2000) propuseram alternativas para melhoria da qualidade ambiental com o uso da escória de alto-forno; aproveitamento dos resíduos gerados na limpeza dos gases de alto-forno através da briquetagem (CASTRO et al., 2002b; ROCHA et al., 2003) bem como avaliação das características agrônômicas do pó de balão (LIMA et al., 2003).

Para as emissões atmosféricas das usinas não-integradas de ferro-gusa a carvão vegetal foi proposto estudo técnico e econômico para avaliar os projetos de controle da poluição (JACOMINO ET AL., 2001) bem como a seleção de padrões de emissão atmosférica para pequenas e médias empresas produtoras de ferro-gusa do Estado de Minas Gerais (JACOMINO ET AL., 2002b). O controle ambiental dos efluentes atmosféricos e líquidos gerados pelas unidades independentes de produção de ferro-gusa de Minas Gerais foi abordado por RIBEIRO ET AL. (1999), além da utilização do gás do alto-forno como fonte energética (BATISTA, 2009).

3.5 - Legislação ambiental aplicável ao setor

A Deliberação Normativa DN COPAM nº49/01 (COPAM, 2001) revogou a DN COPAM nº15/93 (COPAM, 1996) que foi elaborada a partir do relatório desenvolvido em 1992, pelos técnicos da FEAM intitulado “A Poluição das Usinas não-Integradas de Pequeno Porte a Carvão Vegetal para Produção de Ferro-gusa no Estado de Minas Gerais”.

A DN COPAM nº15/96 estabelecia uma série de medidas a serem adotadas pelas empresas, além de convocá-las para o licenciamento junto ao órgão ambiental - FEAM, em um prazo de dez meses, após a data de sua vigência (BENJAMIN, 2006). No entanto, constatarem-se polêmicas quanto aos prazos estabelecidos, às formas de apresentação de projetos, entre outros. Segundo BENJAMIN (2006), apesar das falhas e das dificuldades surgidas na elaboração da DN COPAM nº15/96, constatarem-se efeitos positivos e novas tentativas foram adotadas para elaborar uma legislação condizente com a realidade, contemplando técnicas mais avançadas e desenvolvidas para o cenário específico das indústrias não-integradas de ferro-gusa. MALARD (2009) verificou que

apenas 35,5% destes empreendimentos obtiveram o seu licenciamento ambiental até outubro de 2001, o que fomentou novas discussões que atendessem a realidade do setor. Foi então proposta a DN COPAM nº49/01 que constituiu um marco no setor, pois desta vez, os empreendimentos apresentaram um novo comportamento, tornando factível seu cumprimento, ao contrário de deliberações normativas anteriores.

A DN COPAM nº49/01 consta de dezessete artigos cujos pontos mais relevantes serão destacados seguidamente (COPAM, 2001).

O artigo primeiro ressalta a obrigatoriedade dos produtores de ferro-gusa de melhorar o processo produtivo, garantir a instalação de equipamentos de controle de poluição, realizar a disposição adequada de seus resíduos, e a realização de monitoramento em um prazo máximo de 24 meses.

MALARD (2009) comenta que a promoção de melhorias no processo produtivo salientada em seu artigo primeiro, é subjetiva, o que dificulta a avaliação e cobrança pela FEAM, principalmente, no tocante a disposição dos resíduos sólidos.

O artigo 2 impõe o licenciamento ambiental de forma explícita para os diferentes empreendimentos.

O artigo 4 estabelece os padrões de emissão de material particulado para altos-fornos de empresas não-integradas instaladas na zona urbana de $100\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ e, na zona rural e mista de $200\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$. Já para as empresas não-integradas, instaladas a partir de 2001, o padrão adotado é $50\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ para altos fornos instalados em zona urbana e $100\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ aqueles instalados em zona rural e mista (COPAM, 2001).

O artigo 4 também estabelece que o monitoramento deva ter periodicidade semestral.

O artigo 5 estabelece o conceito de “carga limite” e possibilita que o padrão de emissão atmosférica possa ser excedido no gás do alto-forno, desde que a “carga limite” não seja excedida. Esta flexibilização de transferência de créditos obtida em alguns sistemas de

desempoeiramento para o sistema de lavagem de gás do alto-forno pode, neste caso, ultrapassar o limite estabelecido por esta DN. MALARD (2009) propõe que somente empreendimentos, que realizam monitoramento da qualidade do ar para partículas inaláveis, firmem o Termo de Compromisso de Ajustamento de Conduta com a anuência do COPAM e da FEAM para efetivar a flexibilização.

Os artigos 6 e 7 estabelecem a emissão de material particulado em concentração igual ou inferior a $200\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ em zona rural ou mista, observando ainda que o monitoramento dos sistemas de manuseio de carvão vegetal e de matérias-primas e da metalurgia em panela podem ser dispensados a critério da FEAM se não afetarem as atividades agroindustriais vizinhas ou os recursos naturais de importância considerável (COPAM, 2001).

O artigo 10 exige destes empreendimentos: apresentação do protocolo de solicitação de outorga do uso da água; implantação do cinturão verde; fechamento dos chifres dos altos-fornos; implantação de tochas e queimadores; implementação do sistema de aspersão nas vias internas; implantação do sistema de recirculação das águas de refrigeração dos altos-fornos, do sistema de drenagem e do tratamento primário das águas pluviais. O sistema de armazenamento dos finos de carvão vegetal e finos de minério deverá ser feito em silos protegidos.

MALARD (2009) pondera que a implantação de depósitos temporários de resíduos sólidos industriais; enclausuramento de equipamentos, por exemplo, peneiras e áreas de transferências de matérias-primas; implantação do sistema de exaustão do topo do alto-forno e também no vazamento e, ou, corrida de escória e ferro-gusa; além da regularização da reserva legal e plano de auto-sustentabilidade em carvão vegetal, são de fundamental importância para o controle da poluição neste setor.

Segundo BATISTA (2009) e MALARD (2008), os resíduos sólidos industriais gerados na siderurgia não integrada a carvão vegetal não são perigosos segundo a ABNT NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004), mas podem provocar danos ao meio ambiente quando gerenciados de forma inadequada.

O artigo 12 admite a substituição de carvão vegetal por coque até um percentual máximo de 20% em peso, observadas as porcentagens de enxofre. Em seu parágrafo único, as empresas, que utilizam mais de 20% de coque, devem elaborar um novo processo de licenciamento ambiental.

Os artigos 13 e 14 são relativos à documentação fotográfica e anotação de responsabilidade técnica pela documentação enviada ao órgão ambiental reforçando a obrigatoriedade do envio dos dados referentes ao auto-monitoramento semestralmente. No entanto, MALARD (2009) propõe que o auto-monitoramento deveria ser trimestral para todo o setor como vem sendo feito, não só com as empresas que adotam o conceito de “carga limite”, mas também nos processos de licenciamento de maneira geral. Salienta também a pertinência do órgão ambiental em realizar monitoramentos o que permitiria um melhor acompanhamento pelos técnicos envolvidos.

Conclui-se que a DN COPAM nº49/2001 constitui um avanço para a qualidade ambiental do setor de siderurgia não integrada em Minas Gerais, principalmente, no tocante a implantação dos sistemas de desempoeiramento nas áreas de recepção, preparação e manuseio das matérias primas (carvão vegetal e minério de ferro). MALARD (2009) constatou que 30% dos altos fornos que estavam operando tinham aspecto visual do efluente atmosférico insatisfatório, visto as significativas emissões atmosféricas.

Capítulo 4: Estudo comparativo do sistema de limpeza do gás do alto-forno a seco versus a úmido

4.1 – Introdução

As emissões atmosféricas das usinas não integradas de ferro-gusa a carvão vegetal são, basicamente, as poeiras fugitivas geradas nos pontos de transferências entre equipamentos não estanques, as geradas pela movimentação de veículos em vias não pavimentadas e as lançadas por fontes estacionárias, objeto deste estudo, notadamente, as emissões dos altos-fornos.

Observa-se que a reação de redução no alto-forno, caracteriza-se pela geração de gases que apresentam os seguintes constituintes: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), Nitrogênio (N₂) e material particulado (MP). BATISTA e FIGUEIREDO (1998) ressaltaram que os óxidos de nitrogênio ou de enxofre não são encontrados, pois o alto-forno é operado num ambiente redutor. Já BATISTA (2009) mencionou que a cada 1000Nm³ de ar insuflado nas ventaneiras dos altos-fornos, ocorreram a geração de 2100 a 2300Nm³ de gases por tonelada de ferro-gusa produzido. Estes gases arrastam o material particulado (MP), principalmente os finos, que se tratados adequadamente podem ser emitidos para a atmosfera dentro dos padrões legais de lançamento. O descontrole do processo, principalmente distribuição inadequada da carga no alto-forno, gera fenômenos conhecidos como gaiolas e arriamentos de cargas que são situações de poluição aguda do ar visto a emissão de altas concentrações de material particulado para atmosfera (JACOMINO ET AL., 2002a).

A concentração do MP nos gases de altos fornos a carvão vegetal é de aproximadamente de 17g.(Nm³)⁻¹ sendo sua constituição definida em função da matéria-prima utilizada no processo produtivo mas, de um modo geral, considera-se 25 a 40% de Ferro (Fe), 40 a 45% de Carbono (C), 5 a 7% de óxido de silício (SiO₂) e 2 a 4% de óxido de cálcio (CaO). BATISTA (2009) verificou com relação à distribuição granulométrica do

material particulado contido no gás do alto-forno na Siderúrgica Plantar, em Sete Lagoas, foi de 98,7% do material com tamanho inferior a 184 μm ; 86,1% com tamanho inferior a 83,4 μm ; 67,2% inferior a 46,2 μm ; 44,4% inferior a 23,1 μm ; 28,6% inferior a 12,8 μm e 0,3% inferior a 1,2 μm .

O gás gerado no alto-forno pode ser reutilizado nos *glendons* ou *cowpers* devido ao seu poder calorífico. Para isso, o equipamento de desempoeiramento, quer por via úmida quer por via seca, tem por objetivo reduzir a quantidade de material particulado neste gás e, assim, viabilizar a reutilização desta energia (JACOMINO ET AL., 2002a; MALARD, 2009).

Em seus estudos, MALARD (2009) constatou que em Minas Gerais, 48 siderúrgicas não integradas realizavam limpeza dos gases via úmido, enquanto 20 trabalhavam com coletores a seco. Observou ainda que em todas as siderúrgicas não integradas a carvão vegetal, o coletor gravitacional era utilizado no primeiro estágio para captura de partículas de maior granulometria. Logo, a maioria das unidades independentes utiliza sistema a seco composto de balão coletor, ciclones e multiciclones, devido à baixa pressão dos gases do topo do alto-forno. Algumas unidades utilizavam sistema úmido composto de balão coletor precedido por lavador de gases de baixa pressão necessitando de água como meio de lavagem o que gera a retenção do material particulado na forma de lama (BATISTA, 2009).

No contexto, os sistemas básicos de limpeza de gases de topo do alto-forno são os coletores de pó (balão gravitacional), ciclones e os lavadores de gases (**FIG. 12**) que são indicados por sua eficiência e devem estar em consonância com o artigo 4 da DN nº49/2001 que estabelece os padrões de emissão de material particulado para altos fornos de empresas não integradas instaladas na zona urbana de 100mg.(Nm³)⁻¹e, na zona rural e mista, de 200mg.(Nm³)⁻¹ (COPAM, 2001). Cabe ressaltar que JACOMINO ET AL. (2001) visitaram 29 siderúrgicas e constataram *in loco* que 46% apresentavam sistema de lavagem do gás de alto-forno constituído por balão gravitacional precedido de lavador tipo Venturi sendo que 27% possuem este sistema com dois balões gravitacionais. Além disso, constataram que o sistema mais eficiente e que atendia a

legislação vigente é aquele com pelo menos um coletor de pó e dois lavadores do tipo Venturi em série (BATISTA & FIGUEIREDO, 1998; JACOMINO ET AL., 2001).

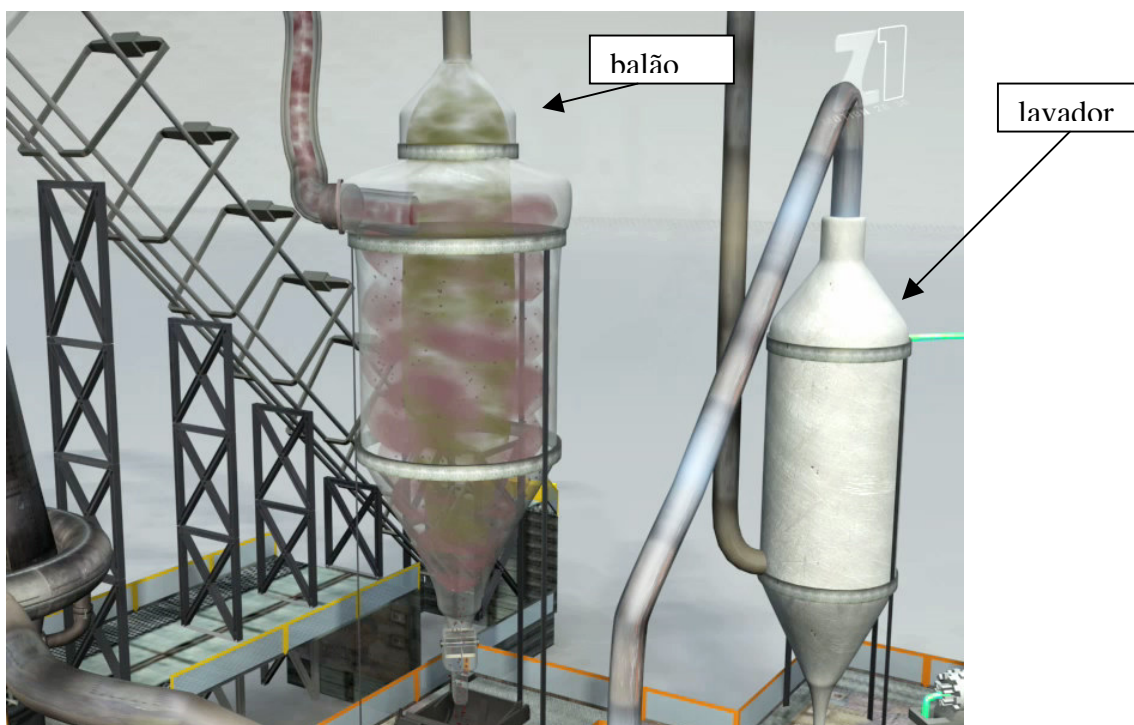


FIGURA 12 - Detalhe do sistema de limpeza de gás de alto-forno destacando balão coletor e lavador de gás.
Fonte: Metalsider/Z1Motion, 2010.

Outro aspecto relevante a ser considerado é que os sistemas de desempoeiramento a seco dificilmente conseguem atingir concentrações inferiores a $150\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ (JACOMINO ET AL., 2002a). O sistema mais eficiente para limpeza dos gases gerados no alto-forno tem demonstrado ser composto no mínimo de um balão gravitacional para retenção das partículas de maiores diâmetros, um lavador tipo Venturi para remoção das partículas de menores diâmetros e além de um desumidificador para retirar a água gerada que iria ser destinada aos *glendons*.

Inicialmente, o procedimento de limpeza dos gases dos altos-fornos tinha como objetivo incrementar a eficiência dos recuperadores de calor e não como mecanismo de controle da poluição do ar. O arranjo relativo destes equipamentos de limpeza apresenta grande variabilidade no setor guseiro. Há tendência de substituir o sistema de limpeza de gases

a seco pelo sistema a úmido, tendo em vista que o sistema a seco pode não atender as exigências propostas na legislação vigente (RIBEIRO ET AL., 2000).

Observa-se que em Minas Gerais não existem altos fornos que utilizam filtros de manga para limpeza destes gases. As tentativas de utilização deste equipamento não foram positivas, principalmente devido à presença do alcatrão e umidade no gás, o que impede a utilização deste tipo de equipamento de limpeza e o custo de implantação mostrou-se impraticável (BATISTA, 2009).

No balão gravitacional (coletor de pó), o material particulado é coletado por força gravitacional. Por isso, tais equipamentos possuem grandes dimensões permitindo que o gás proveniente do alto-forno penetre na parte inferior de um tubo cônico, cujo diâmetro aumenta progressivamente. Para sair na parte superior do coletor, o gás é forçado a mudar de direção e sua velocidade diminui devido à maior seção e o pó arrastado é depositado no fundo do balão. Além disso, o selo do coletor pode ser a seco ou a úmido. Suas principais vantagens são baixo custo de operação e implantação, pequeno desgaste, baixo consumo de energia, baixa perda de carga (10mmca), coleta a seco do material particulado, projeto simples e podendo operar em altas temperaturas. Entretanto, ocupam um considerável espaço e não retêm satisfatoriamente partículas de pequeno diâmetro, trabalhando com eficiência média de 60 a 80% (BATISTA, 2009). Em síntese, o coletor de pó (**FIG. 13**) é um equipamento simples para a separação de partículas em um fluxo gasoso, porém é mais utilizado como pré-coletor, devido à limitação de coleta de partículas menores que 50 μ m.

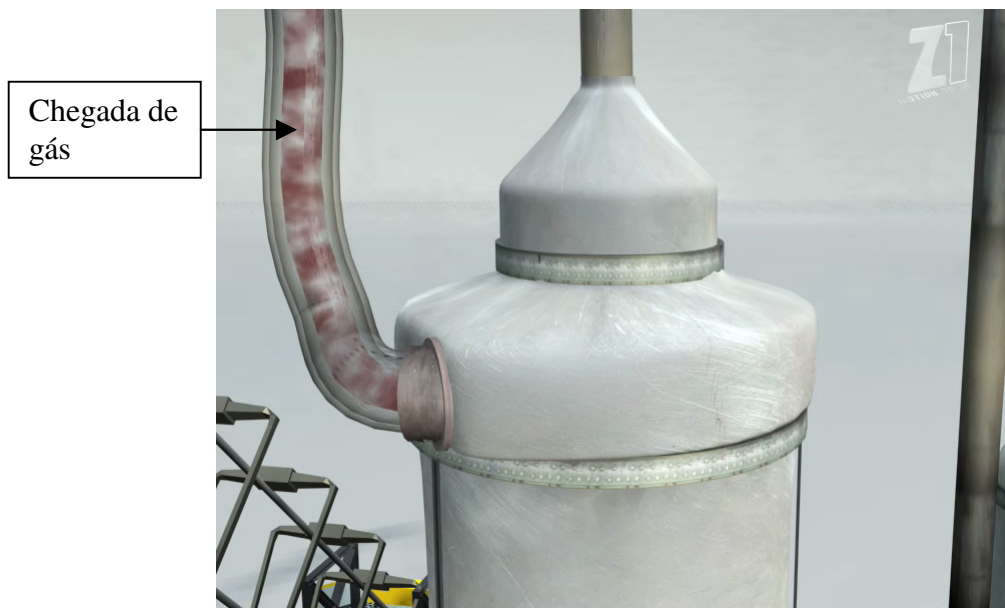


FIGURA 13 - Chegada do gás do AF no balão gravitacional/coletor de pó.
Fonte: Metalsider/Z1 Motion, 2010.

O ciclone utiliza a força centrífuga sobre as partículas sólidas em movimento num fluxo rotativo, empurrando as partículas em direção às suas paredes que perdem o movimento e caem no fundo do ciclone, retirando-se do fluxo gasoso. Em geral, são utilizados como pré-coletores, em função de sua limitação para coletar partículas com diâmetros menores que $5\mu\text{m}$ (LISBOA & SCHIRMER, 2008). São vantajosos por apresentarem baixo custo, operação e projeto simplificados, poucos problemas de manutenção devido à simplicidade do equipamento, exigem relativamente pouco espaço para instalação, possuem baixa perda de carga, apresentando alta resistência à corrosão e à temperatura e possuem coleta a seco. Por outro lado, possuem baixa eficiência para partículas inferiores a $5\mu\text{m}$, pois esta depende das condições operacionais (menor vazão implica em menor eficiência), existindo possibilidade de abrasão para determinadas partículas e velocidades e, no caso de altos-fornos, possuem a eficiência máxima observada em torno de 80% (MALARD, 2009).

Segundo LORA (2002), os multiciclones (quando vários ciclones estão dispostos em paralelo) permitem utilizar células de alta eficiência com menor diâmetro e maior velocidade de entrada do gás.

Já os lavadores de gases (**FIG. 14**) são projetados para incorporar as partículas de pó nas gotículas de água com diâmetro de 50 a 500 μ m, produzidas por um bico spray, pelo efeito de aspiração do fluxo gasoso, pelo cisalhamento do filme do líquido ou pelo movimento de um rotor movido mecanicamente. Posteriormente, este material é coletado por mecanismos simples, tal como gravidade, impactos em anteparos ou por ação ciclônica.

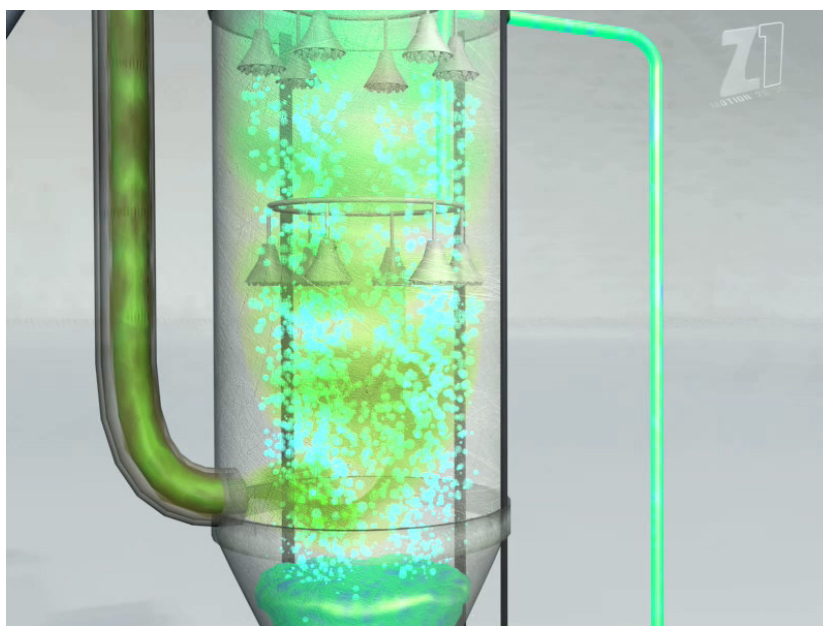


FIGURA 14 – Lavador de gás típico de baixa pressão.
Fonte: Metalsider/Z1 Motion, 2010.

De acordo com BATISTA & FIGUEIREDO (1998), os principais requisitos para um bom desempenho de um lavador são vazão de água, perda de carga e velocidade relativa entre a partícula de pó e a gota de água. A água de lavagem não deve conter sólidos, pois esses tendem a se acumular nos condutos ou nos bicos aspersores, restringindo o fluxo. Além disso, os lavadores de alta energia como os Venturis, mais eficientes, podem ser utilizados apenas se o alto-forno operar com pressões compatíveis de topo, fornecendo a pressão necessária visando vencer a perda de carga do fluxo de lavagem. Constata-se que a pressão média de topo dos altos fornos independentes é de aproximadamente de 800mmca (9,8N.m²) o que é suficiente para operar um lavador tipo Venturi de baixa e, ou, média eficiência.

Os lavadores são vantajosos porque requerem pouco espaço para instalação; podem ser utilizados com gases a altas temperaturas; neutralizam gases e névoas corrosivas; resfriam os gases, e independem do alcatrão presente nos gases de alto-forno. Como principais desvantagens, necessitam tratar o efluente líquido bem como o material coletado na forma de lama; apresentam alta perda de carga quando precisam de alta eficiência de coleta o que implica em maior custo operacional e sistema de ventilação mais potente para minimizar as perdas de carga do sistema (BATISTA, 2009).

Nos lavadores Venturi de baixa eficiência ou “lavador gás-atomizador”, os gases passam através de uma constricção na parte superior (garganta) que aumenta a sua velocidade sendo que, na ordem de 60 a 120m.s⁻¹, a água injetada na entrada do equipamento é atomizada em quantidades que variam de 0,4 a 1,0cm³.m⁻³, cujas gotas apresentam tamanho médio de 50µm. Observou-se ainda que as partículas sólidas são coletadas por impactação, interceptação e condensação (JACOMINO ET AL., 1999).

O lavador Venturi apresenta alta eficiência de coleta e alta perda de carga. Segundo JACOMINO ET AL. (1999), suas principais características são vazão do gás = 95 a 68.400L.s⁻¹; velocidade na garganta = 60 a 183m.s⁻¹; perda de carga = comum de 250 a 750mmH₂O (0,0001kgf.cm⁻²); temperatura do gás é ilimitada, desde que o gás chegue completamente saturado à garganta ou que se injete água suficiente para compensar a evaporação. Apresentam eficiência de 98% para partículas com diâmetro aerodinâmico equivalente maior ou igual a 1µm.

O desempenho de 89,74% dos alto-fornos que possui lavadores de gases foi considerado visualmente satisfatório, demonstrando que este equipamento é o mais eficiente para a limpeza dos gases (MALARD, 2009).

MALARD (2009) constatou que a diferença entre as emissões atmosféricas emitidas por sistemas de limpeza de gases a seco ou a úmido não é tão grande quanto teoricamente deveria ser. Observou que a maioria dos empreendimentos que utilizavam o sistema a seco, apresentou resultados inferiores a 100mg.(Nm³)⁻¹. Além disso, os entrevistados nas indústrias alegaram que não há necessidade de implantar lavadores de gases visto

que tais empreendimentos já atendiam aos padrões estabelecidos na DN n°49/2001 (COPAM, 2001).

Neste contexto, o objetivo deste capítulo foi comparar a eficiência dos sistemas de limpeza de gases a seco e úmido através da determinação da concentração de material particulado emitido por fontes estacionárias através de amostragem isocinética.

4.2 – Metodologia

4.2.1 – Caracterização do empreendimento estudado

A Metalsider Ltda., empresa siderúrgica não-integrada produtora de ferro-gusa, está localizada no Município de Betim, Minas Gerais, em um distrito industrial caracterizado pelo plano diretor (**FIG. 15**). Seus limites são a área urbana na porção frontal e as margens do Rio Betim que contorna os limites do terreno. Sua área ocupa 900.000m² sendo que a planta industrial, com seus sete altos-fornos ocupa uma área de 500.000m² e tem capacidade nominal de 1.000t.dia⁻¹.



FIGURA 15 – Vista geral da Metalsider Ltda..
Fonte: Metalsider, 2009.

A empresa é certificada pelo *Bureau Veritas Certification* nas normas ISO 9.002 e ISO 14.001, e tem como política a melhoria contínua de seu sistema de gestão integrada culminando em investimentos constantes na área ambiental. O resultado desta postura deixa a empresa na vanguarda tecnológica e garante de maneira sustentável todos os seus planos de ampliação.

Dentro deste ambiente, foi possível o desenvolvimento desta tese através da mudança do sistema de limpeza dos gases dos altos-fornos modelo via seca para via úmida conforme fluxograma típico apresentado na **FIG. 16**.

Metalsider - Setor 01 e 02

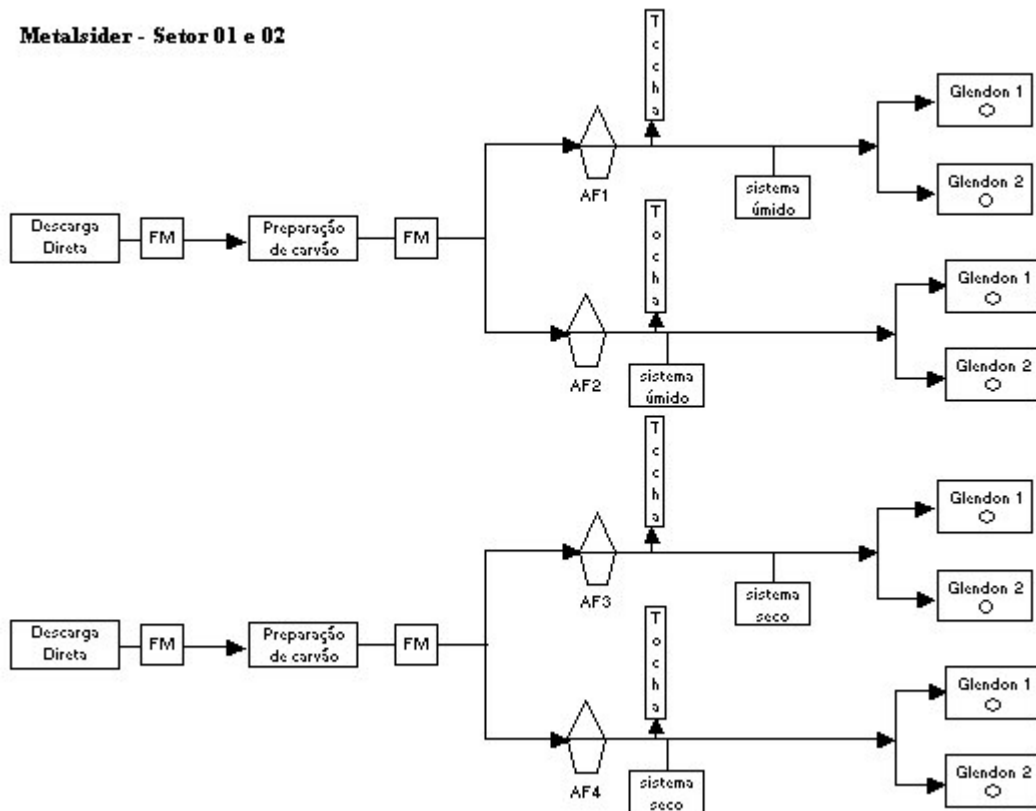


FIGURA 16 A – Fluxograma do processo produtivo típico do ferro-gusa na Metalsider Ltda. Setor 01 e 02.

Fonte: Próprio autor

Metalsider - Setor 03

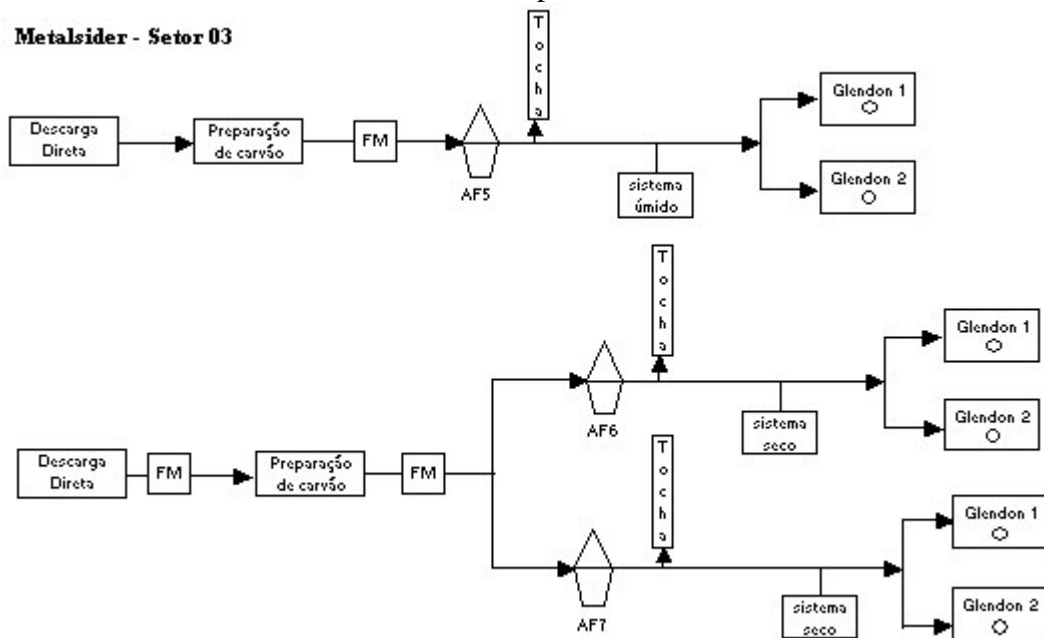


FIGURA 16 B- Fluxograma do processo produtivo típico do Ferro-gusa na Metalsider Ltda no setor 3.

Fonte: Próprio autor.

Em 2011, a empresa conta com 750 funcionários na produção do ferro gusa destacando, entre seus clientes, as maiores fundições do país. O termoredutor do processo é proveniente de floresta plantada em área própria, ocupando aproximadamente 50.000 hectares em Minas Gerais e Sul da Bahia. A empresa realizou seu inventário de emissões de CARBONO, ano base 2009, através da metodologia *Foot Print* abrangendo a usina siderúrgica e suas florestas homogêneas de *Eucaliptus sp.* Ainda na parte ambiental, a empresa é responsável pelo monitoramento da qualidade do ar em Betim e, em 2010, iniciou a operação de sua unidade termoelétrica utilizando, como combustível, o gás de alto-forno excedente do processo para a geração máxima de 9,0MW.

Ressalta-se que a Metalsider Ltda. demonstrou grande interesse em inovar, permitindo a transição dos sistemas seco para o úmido, visando o aproveitamento do gás limpo para geração de energia elétrica. A empresa consome 50% da energia que gera e exporta o restante para o sistema nacional. Com esta unidade geradora em funcionamento, tornam-se cruciais as operações de limpeza dos gases dos altos-fornos cuja eficiência é fator determinante no sucesso da unidade termoelétrica.

Na Metalsider Ltda., a introdução gradual ocorreu com base nos resultados da concentração de material particulado emitido nas respectivas fontes estacionárias e obtidos através da amostragem isocinética, no período de 2002 a 2010. Conciliando a manutenção dos altos-fornos bem como os seus processos de operação, permitiu-se comparar os sistemas de limpeza dos gases, seja pelo sistema seco ou pelo sistema úmido, nos mesmos equipamentos.

Salienta-se que as alterações de sistema seco (configuração típica): um balão coletor seco mais um balão com selo hidráulico para o sistema úmido (configuração típica): um balão coletor seco mais um balão com selo hidráulico e um lavador para cada um dos sete altos-fornos obedeceram à seguinte cronologia:

- AF 01 – alterou do sistema seco para o sistema úmido em julho/2004;
- AF 02 – alterou do sistema seco para o sistema úmido maio/2005;
- AF 03 – alterou do sistema seco para o sistema úmido fevereiro/2006;
- AF 04 – alterou do sistema seco para o sistema úmido maio/2005;

- AF 05 – alterou do sistema seco para o sistema úmido maio/2005;
- AF 06 – alterou do sistema seco para o sistema úmido julho/2007;
- AF 07 – permanece com sistema a seco durante todo o período de estudo.

4.2.2 – Condições de amostragem

As fontes de emissão de poluentes atmosféricos podem ser quantificadas através de monitoramento dos gases e material particulado contidos no fluxo gasoso conforme propõe a DN n°49/2001 (COPAM, 2001).

O monitoramento das fontes estacionárias deve ser acompanhado de informações a respeito do processo como: 1 - Pressão da coroa (mmca); 2 - Pressão do topo do alto-forno (mmca); 3 - Temperatura da coroa (°C); 4 - Temperatura do topo (°C); 5 – Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$); 6 - Produção de gusa ($\text{t} \cdot \text{dia}^{-1}$); 7 - Número de cargas por hora; 8 - Episódios excepcionais (se houver).

Inicialmente, delineou-se o programa de amostragem para fontes estacionárias conforme estabelecido pela NBR 10.700 (ABNT, 1989a) bem como a determinação dos pontos de amostragem NBR 10.701 (ABNT, 1989b). Na Metalsider Ltda., a frequência de amostragem foi estabelecida trimestral no período de 2002 a 2010.

A amostragem isocinética é a coleta realizada em condições tais, que o fluxo de gás na entrada do equipamento tem a mesma velocidade que o fluxo de gás que se pretende analisar.

O material particulado é coletado isocineticamente (**FIG. 17**) e a sua massa determinada gravimetricamente, após a eliminação da água não combinada. Neste estudo, as amostragens isocinéticas foram conduzidas conforme as exigências das normas técnicas:

- NBR 10.702 (ABNT, 1989c) para determinação da massa molecular base seca;
- NBR 11.966 (ABNT, 1989d) para determinação velocidade e vazão;

- NBR 11.967 (ABNT, 1989e) para determinação a umidade;
- NBR 12.019 (ABNT, 1990) para determinação do material particulado.

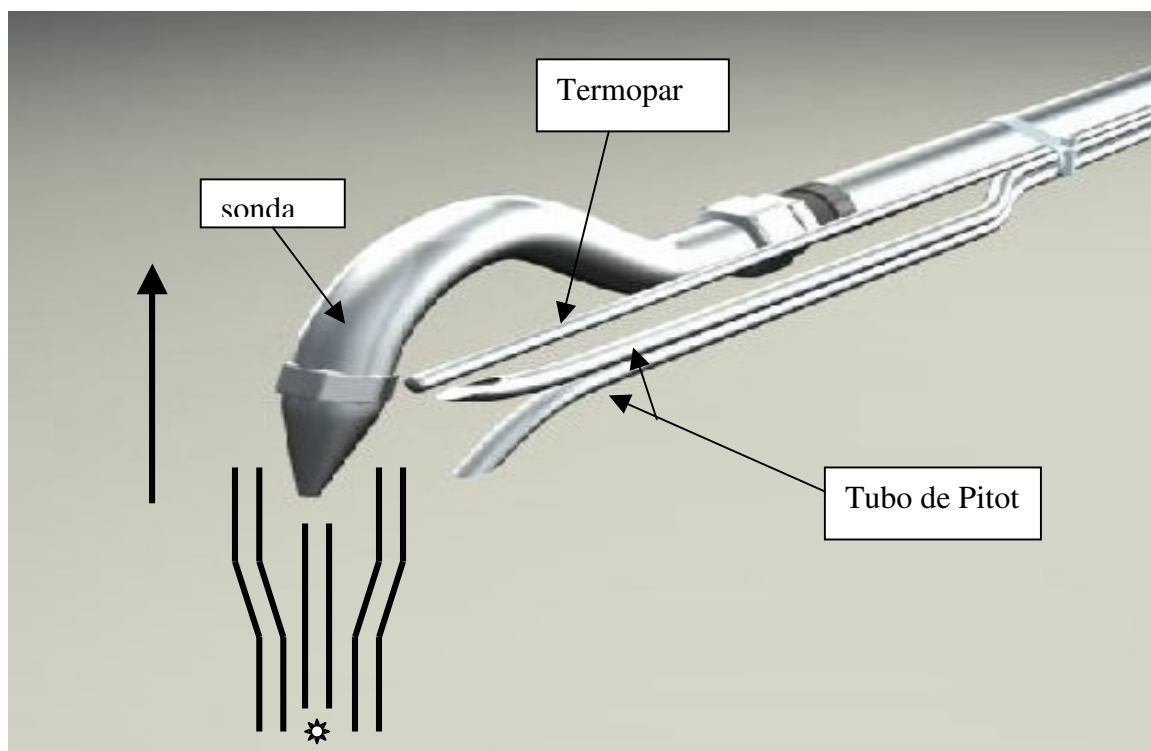


FIGURA 17 - Situação de isocineticidade de coleta de material particulado.
Fonte: Z1 Motion, 2010.

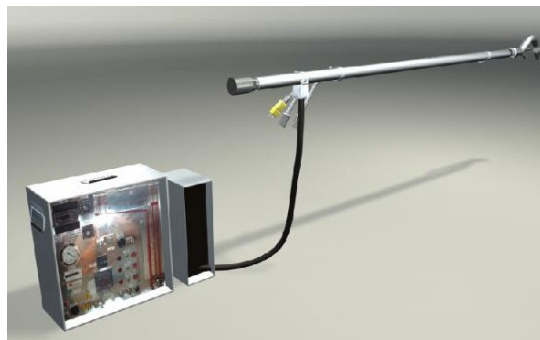
As variáveis que precedem a amostragem isocinética, constituem a planilha de campo, conforme apresentado na tabela 03 sendo: pressão atmosférica (mmHg) obtida por barômetro; pressão estática (mmH₂O) via manômetro inclinado presente no painel do Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (CIPA) (**FIG. 18**); diâmetro da chaminé (m); diâmetro da boquilha (mm); fator de correção do Tubo de Pitot e fator de correção do medidor devidamente calibrados. A umidade dos gases (%) é obtida conforme a NBR 11.967 (ABNT, 1989e).

A **TAB. 03** refere-se ao modelo de planilha adotada para coleta dos dados de campo.

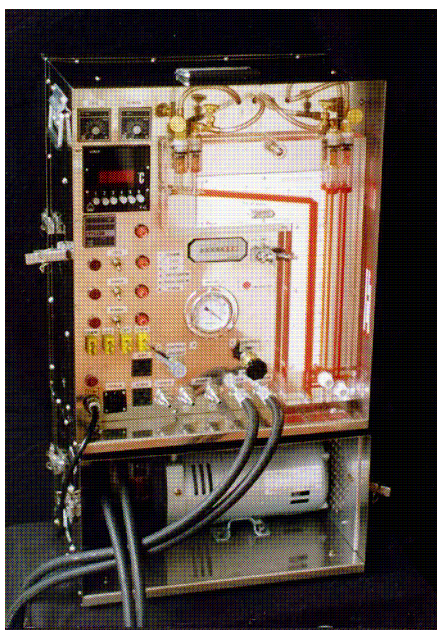
Tabela 03

Planilha para coleta de dados nos pontos pré estabelecidos.

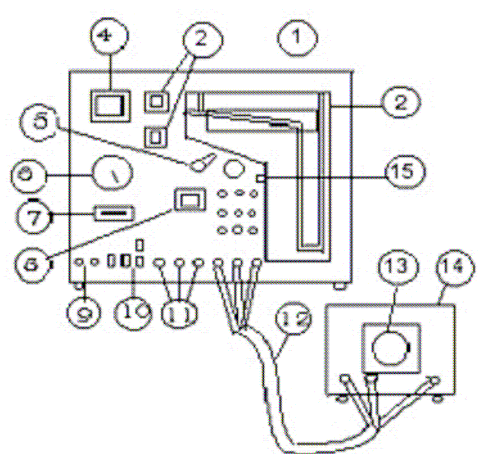
PONTO	TEMPO	DISTÂNCIA (min.)	VOL.MEDI DO (L)	ΔP (mmH ₂ O)	ΔH (mmH ₂ O)	TEMP. MEDIDOR (°C)		TEMP. CHAM. °C
						ENT.	SAÍDA	
01								
02								
03								
04								
05								
06								
07								
08								
09								
10								
11								
12								



(a)



(b)



(c)

FIGURA 18 - (a) Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos (CIPA); (b) painel de controle e bomba de vácuo (CIPA); (c) Identificação das partes do painel de controle e sistema de sucção: 1. Console, 2. Manômetro duplo, 3. Controladores de Temperatura, 4. Indicador de temperatura, 5. Válvulas ajuste bomba, 6. Vacuômetro, 7. Gasômetro, 8. Horâmetro, 9. Força, 10. Termopares, 11. Engates inox, 12. Umbilical bomba, 13. Ventilador bomba, 14. Bomba de vácuo, 15. Ajuste nível manômetro
Fonte: (c) ENERGÉTICA – QUALIDADE DO AR, 2009.

Os trabalhos de campo realizados com o CIPA (**FIG. 18**) são precedidos de planilhas de campo (**TAB. 03**) e por um memorial de cálculo envolvendo todas as equações necessárias para determinação da concentração de material particulado NBR 12.019 (ABNT, 1990).

Observa-se que o CIPA permite ao usuário monitorar velocidades, temperaturas, pressões e vazões visando manter amostragem isocinética dos gases. Durante a amostragem, parâmetros como velocidade NBR 11.966 (ABNT, 1989d) e temperatura dos gases são constantemente monitorados, e a vazão NBR 11.966 (ABNT, 1989d) periodicamente ajustada de modo que a velocidade na boquilha se iguale à velocidade dos gases (**FIG. 19**).

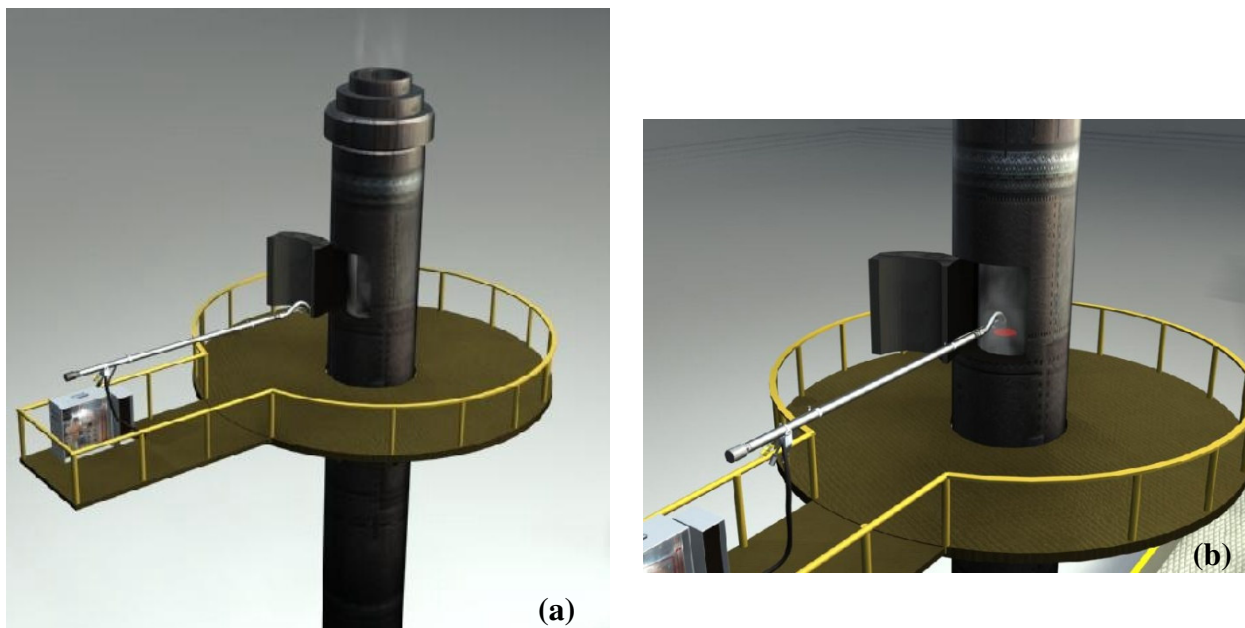


FIGURA 19 – (a) Detalhe da plataforma preparada para amostragem isocinética com utilização do CIPA; (b) detalhe da sonda do CIPA no interior da chaminé realizando uma amostragem isocinética.

Fonte: Z1 Motion, 2010.

A partir dos dados coletados com o CIPA (itens de 1 a 5, 10), o analisador de gás ORSAT (item 7) ou medido *in loco* (item 17) foi desenvolvida a seguinte memória de cálculo (equações 1 a 14) para cada campanha, envolvendo as equações necessárias para determinação da concentração de material particulado como demonstrado a seguir:

1. **Temperatura da chaminé (Tc)** = Temperatura média medida nos furos de amostragem em K.
2. **Temperatura do medidor (Tm)** = Temperatura média tomada durante a amostragem em K.
3. **Volume de gás amostrado (Vm)** em metros cúbicos.
4. **Tempo de amostragem (t)** em minutos.
5. **Diferença de pressão ($\sqrt{\Delta P}$):** mmH₂O = P médio, medido nos pontos da seção transversal do duto.

6. **Peso total do material particulado:** em miligramas

Equação 1: $P_{tMP} = P_{MP} \text{ retido no filtro} + P_{MP} \text{ retido na sonda e mangueira}$

7. **Peso molecular dos gases (Base Seca) (Pms):** g.(g.mol)⁻¹ obtido pelo analisador de gás ORSAT conforme a NBR 10.702 (ABNT, 1989).

8. **Pressão da chaminé (Pc):** mmHg

Equação 2: $P_c = P_{atm} + P_{est} / 13,6$

9. **Pressão do medidor (Pm):** mmHg

Equação 3: $P_m = P_{atm} + \Delta H / 13,6$

10. **Massa de água no gás (Ma)** em gramas.

11. **Volume de água medido (Vacc):** em metros cúbicos.

Equação 4: $V_{acc} = (M_a \times T_c / 18 \times P_c) \times 0,06236$

12. **Volume do medidor nas condições da chaminé (Vmcc):** em metros cúbicos

Equação 5: $V_{mcc} = V_m \times [(T_c \times P_m) / (T_m \times P_c)] \times F_{cm}$

F_{cm} = fator de correção do medidor

13. **Volume de vapor no gás (Pvva):** %

Equação 6: $P_{vva} = V_{acc} / (V_{acc} + V_{mcc})$

14. **Peso Molecular dos gases (Base Úmida)(Pmu):** g.(g.mol)⁻¹

Equação 7: $P_{mu} = P_{ms} \times [(1 - P_{vva}) + (18 \times P_{vva})]$

15. **Velocidade dos gases (Vc):** m.min⁻¹

Equação 8: $V_c = 2098,2 \times C_p \times [(\sqrt{T_c}) / (P_c \times P_{mu})] \times \sqrt{\Delta P}$

C_p = fator de calibração do Tubo de Pitot

16. **Área da boquilha (Ab):** m² estabelecido em função da velocidade do gás.

17. **Área da chaminé (Ac)** em metros quadrados medidos *in loco*.

18. **Vazão dos gases na chaminé (Vgcc):** m³.h⁻¹

Equação 9: $V_{gcc} = A_c \times V_c \times 60$

19. **Vazão dos gases corrigida, CNTP (Vzcs):** m³.h⁻¹

Equação 10: $V_{zcs} = V_{gcc} \times [(273 \times P_c) / (T_c \times 760)] \times (1 - P_{vva})$

20. **Volume amostrado, CNTP (Vmcn),** em metros cúbicos.

Equação 11: $V_{mcn} = V_m \times [(273 \times P_m) / (T_m \times 760)] \times F_{cm}$

21. **Concentração de Material Particulado (Cp):** mg.(Nm³)⁻¹

Equação 12: $C_p = M_{tp} / V_{mcn}$

22. **Taxa de Emissão de Material Particulado (Te):** kg.h⁻¹

Equação 13: $T_e = C_p \times V_{zcs} \times 10^{-6}$

23. **Condições Isocinéticas (I)** em porcentagem (%)

Equação 14: $I = [(V_{mcc} + V_{acc}) / (t \times A_b \times V_c)] \times 100$

Face às alterações operacionais ocorridas nos altos-fornos na produção do ferro-gusa, o tratamento estatístico realizado constou da determinação das médias das concentrações de MP, os valores máximos e mínimos das concentrações obtidas sendo apresentados em gráficos que facilitam a comparação entre os sistemas estudados.

4.3 – Resultados e Discussão

Observa-se que o programa de monitoramento delineado para períodos trimestrais, conforme a DN COPAM nº49/01, não pode ser obedecido devido a causas diversas como: paralisação da produção em face de pouca demanda do mercado, manutenção dos altos-fornos, final de campanha com reformas de chaparia e refratários, entre outros. Para facilitar a compreensão dos dados obtidos na amostragem isocinética e ressaltando a eficiência comparativa de cada um dos sistemas estudados para cada um dos sete altos-fornos da Metalsider Ltda., no período de 2002 a 2010, os gráficos foram individualizados sendo apresentados em vermelho para o sistema a seco e azul, para o sistema a úmido, em que há presença do lavador de gases.

A importância da comparação destes sistemas de limpeza dos gases se deve ao grau de pureza necessário para que o gás propicie funcionamento adequado da termoelétrica, sem interrupções, visando à geração de energia elétrica.

O alto-forno 01 tem como característica um volume útil de 75m³ e capacidade instalada de 180 t.dia⁻¹, operando com a pressão de topo de 500mmca. Foram realizadas 26

campanhas na chaminé dos *glendons* do referido AF de abril de 2002 a novembro de 2010: efetuadas seis campanhas com o alto forno equipado com sistema a seco e 20 campanhas com o sistema úmido. Neste contexto, o sistema a seco apresentou média das concentrações de $133,2\text{mg}.\text{(Nm}^3\text{)}^{-1}$, tendo sido obtido a mínima concentração de $71,9\text{mg}.\text{(Nm}^3\text{)}^{-1}$ e a máxima de $190,6\text{ mg}.\text{(Nm}^3\text{)}^{-1}$ (**GRÁF. 01**).

Com a implantação do sistema úmido, a concentração média de partícula no gás foi de $80,6\text{mg}.\text{(Nm}^3\text{)}^{-1}$, sendo que a concentração mínima obtida foi de $24,3\text{mg}.\text{(Nm}^3\text{)}^{-1}$ e a máxima de $153,1\text{mg}.\text{(Nm}^3\text{)}^{-1}$ conforme apresentado no **GRÁF. 01**.

Ressalta-se que em 2010, foi colocada em funcionamento a termoeétrica do empreendimento com a diminuição do envio de gás para os *glendons* com consequente redução de vazão e concentração de MP.

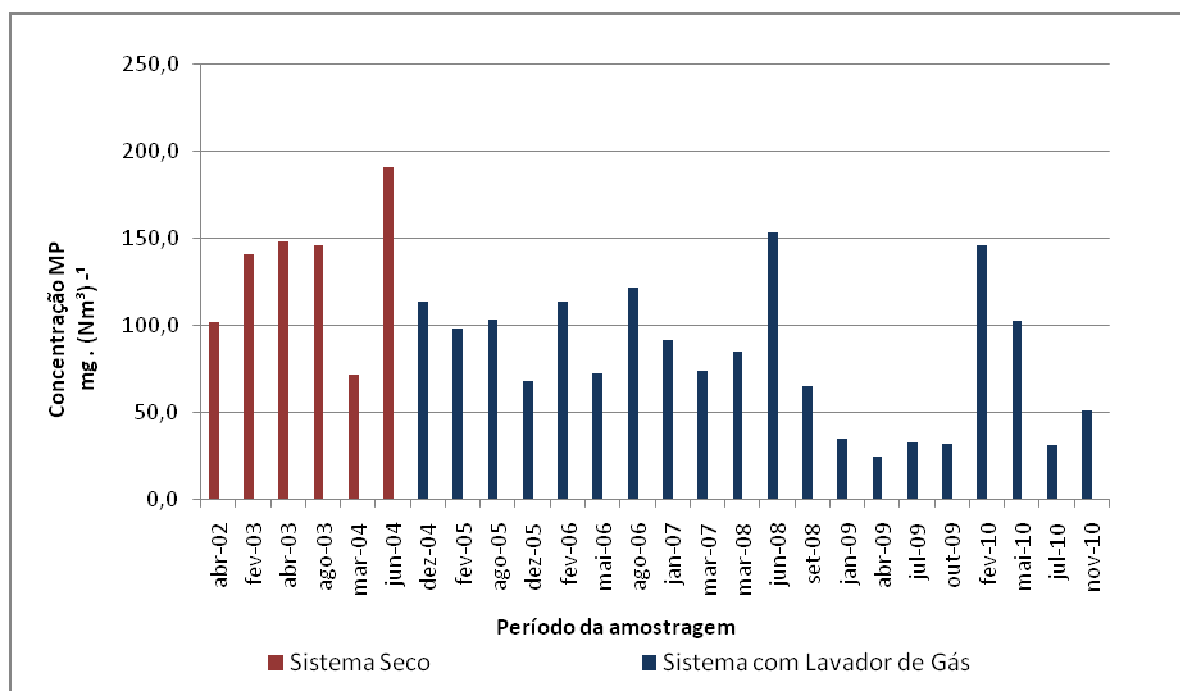


GRÁFICO 01 – Concentração de partículas no gás no AF – 01 (2002-2010).

Fonte: Próprio autor.

O alto-forno 02 tem como característica um volume útil de 75m^3 e capacidade instalada de $180\text{t}.\text{dia}^{-1}$, operando com a pressão de topo de 500mmca . Foram realizadas 21 campanhas na chaminé dos *glendons* do referido AF de abril 2002 a novembro de 2010,

sendo efetuadas 08 campanhas com o alto forno equipado com sistema a seco e treze campanhas com o sistema úmido.

O **GRÁF. 02** apresenta para o sistema a seco, a média das concentrações de MP foi de $156,0\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$, tendo sido obtido a mínima concentração de $61,0\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ e a máxima de $285,0\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$. Com a implantação do sistema úmido a concentração média de partícula no gás foi de $84,6\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$, sendo que a concentração mínima obtida foi de $34,2\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ e a máxima de $131,2\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$.

Ressalta-se que em 2010, foi colocada em funcionamento a termoelétrica do empreendimento com a diminuição do envio de gás para os *glendons* com consequente redução de vazão e concentração de MP.

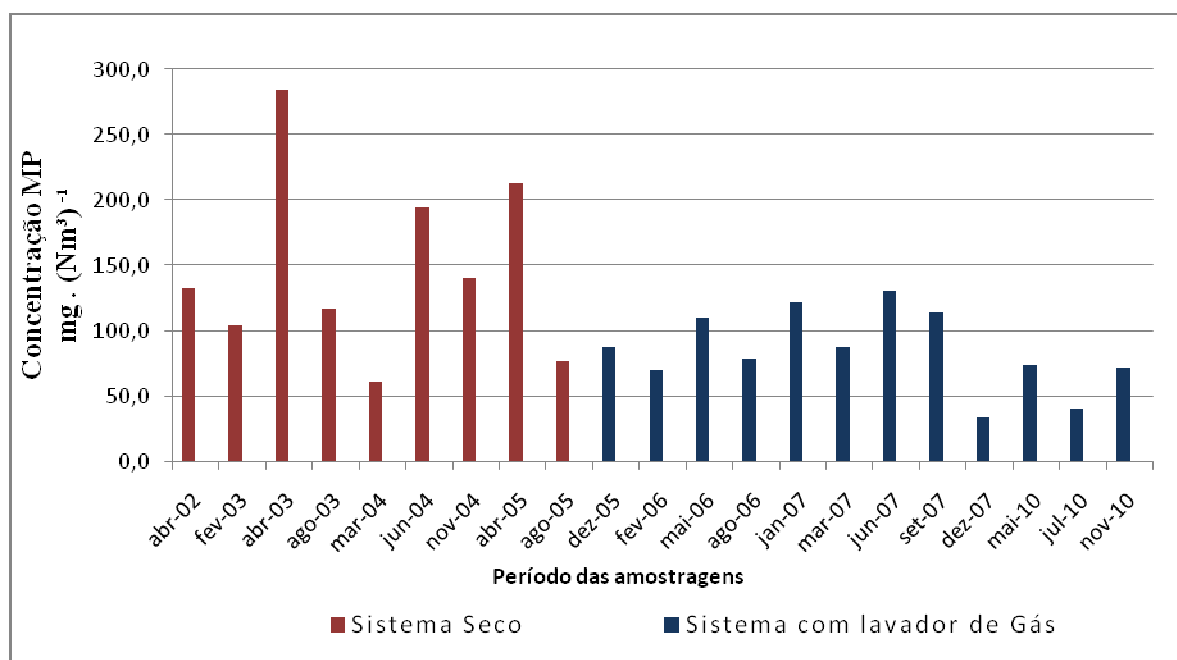


GRÁFICO 02 – Concentração de partículas no gás no AF – 02 (2002-2010).

Fonte: Próprio autor.

O alto-forno 03 também apresenta como característica um volume útil de 75m^3 e capacidade instalada de $180\text{t} \cdot \text{dia}^{-1}$, operando com a pressão de topo de 500mmca . Foram realizadas dezesseis campanhas na chaminé dos *glendons* do referido AF de outubro de 2003 a junho de 2008, sendo efetuadas sete campanhas com o alto-forno equipado com

sistema a seco e nove campanhas com o sistema úmido. Observa-se que a última campanha realizada no AF-3 foi em 2008 visto as restrições de mercado (BRASIL, 2010) e manutenção do mesmo.

Com o sistema a seco, a média das concentrações obtidas foi de $129,6\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$, sendo que mínima concentração de $92,0\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ e a máxima de $193,0\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$. Com a implantação do sistema úmido, a concentração média de partícula no gás foi de $78,4\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$, sendo que a concentração mínima obtida foi de $30,1\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ e a máxima de $116,0\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$, conforme apresentado no **GRÁF. 03**.

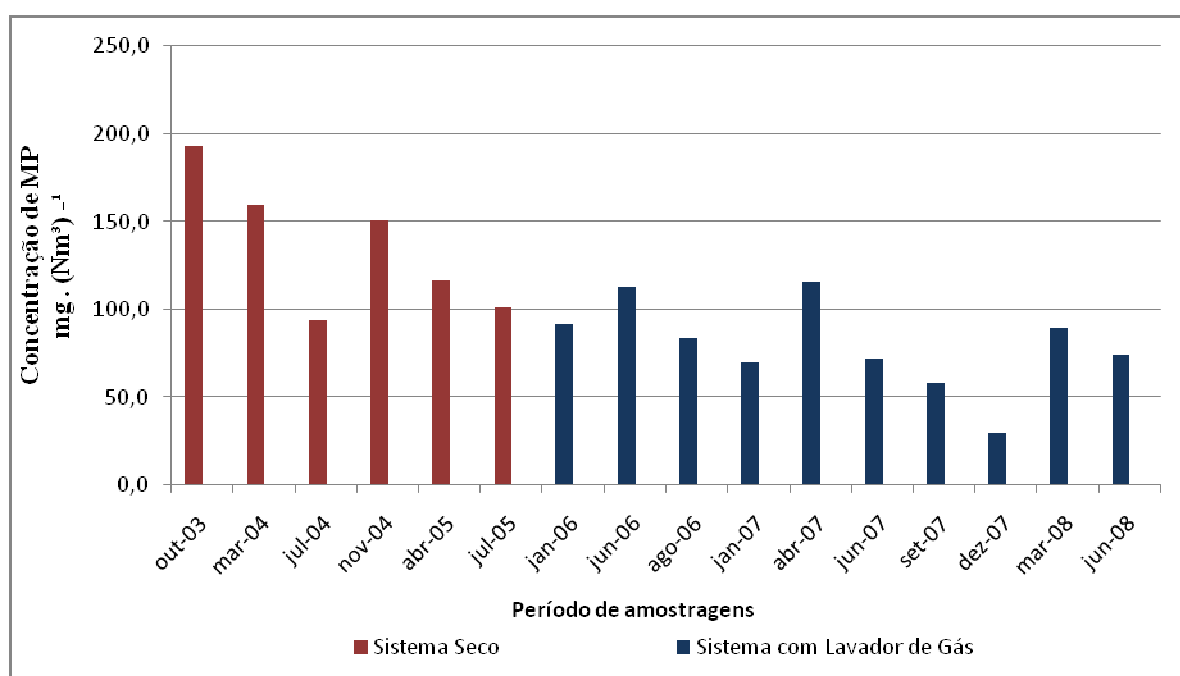


GRÁFICO 03 – Concentração de partículas no gás no AF – 03 (2003-2008).

Fonte: Próprio autor.

O alto-forno 04 tem como característica um volume útil de 75m^3 e capacidade instalada de $180\text{t} \cdot \text{dia}^{-1}$, operando com a pressão de topo de 500mmca . Foram realizadas dezenove campanhas na chaminé dos *glendons* do referido AF de junho de 2002 a dezembro de 2010, sendo efetuadas seis campanhas com o alto forno equipado com sistema a seco e treze campanhas com o sistema úmido.

No **GRÁF. 04**, observou-se que, com o sistema a seco, a média das concentrações foi de $143,0\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$, sendo a mínima concentração de $89,0\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ e a máxima de $190,7\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$. Com a implantação do sistema úmido, a concentração média de partícula no gás foi de $66,1\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$, sendo que a concentração mínima foi de $33,0\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ e a máxima de $150,1\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$.

A partir de 2010, com a entrada em operação da termoelétrica parte do gás foi desviada para geração de energia elétrica.

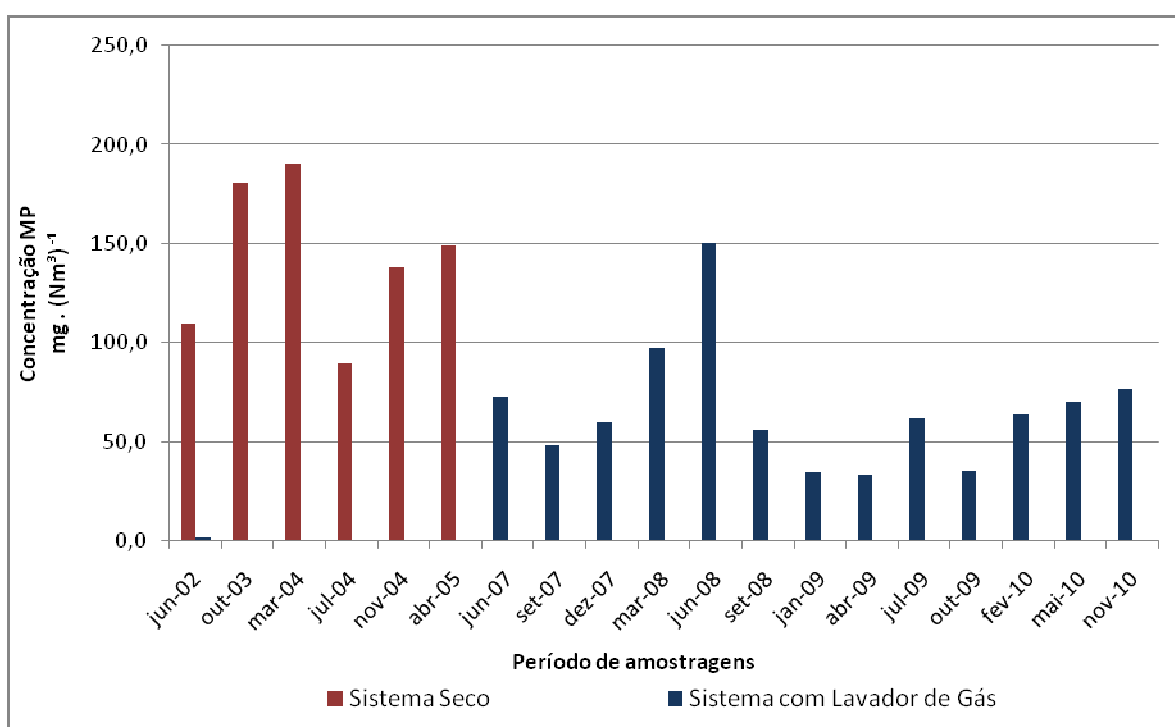


GRÁFICO 04 – Concentração de partículas no gás no AF – 04 (2002-2010).

Fonte: Próprio autor.

O alto-forno 05 tinha como característica um volume útil de 50m^3 , quando equipado com o sistema a seco. A partir de 2007, após sua reforma, o volume útil passou para 75m^3 e capacidade instalada de $180\text{t} \cdot \text{dia}^{-1}$, operando com a pressão de topo de 500mmca . Foram realizadas dezenove campanhas na chaminé dos *glendons* do referido AF de junho de 2002 a novembro de 2010: efetuadas seis campanhas com o alto forno equipado com sistema a seco e treze campanhas com o sistema úmido.

Com o sistema a seco, a média das concentrações obtidas foi de $154,8\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$, tendo sido obtida a mínima concentração de $46,9\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ e a máxima de $419,0\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ (**GRAF. 05**). Com a implantação do sistema úmido a concentração média de partícula no gás foi de $65,0\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$, sendo que a concentração mínima obtida foi de $23,2\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ e a máxima de $291,4\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ (**GRÁF. 05**).

Em 2010, parte do gás foi desviada dos *glendons* para a termoelétrica o que explica a diminuição da vazão e a concentração de MP.

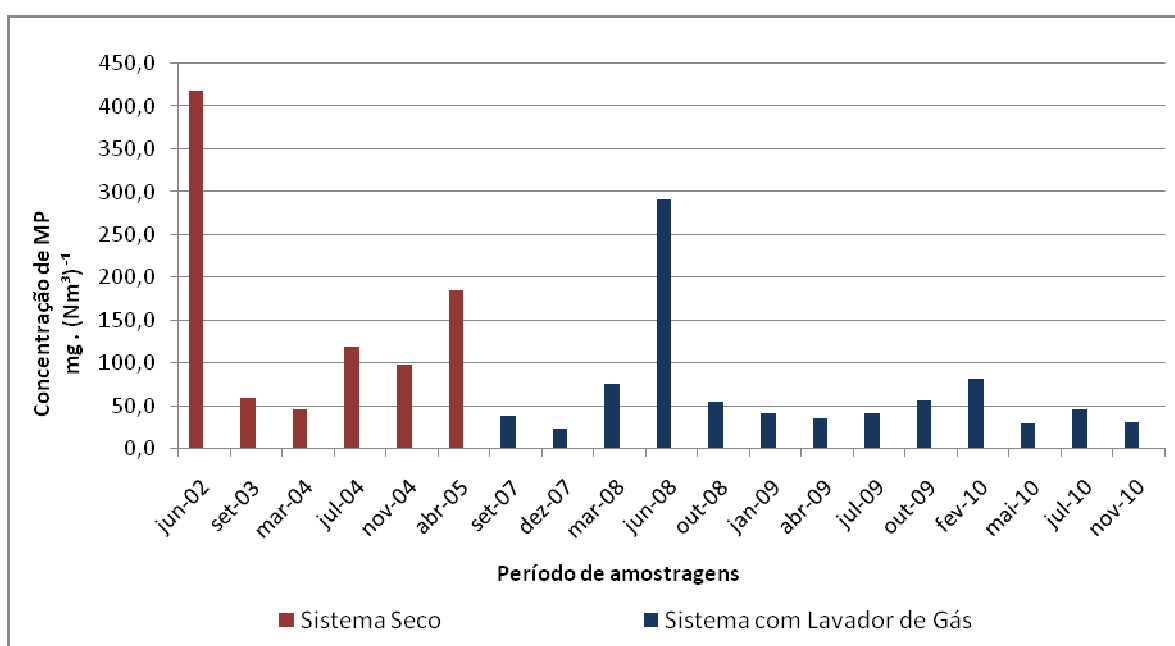


GRÁFICO 05 – Concentração de partículas no gás no AF – 05 (2002-2010).

Fonte: Próprio autor.

O alto-forno 06 tem como característica um volume útil de 75m^3 e capacidade instalada de $180\text{t} \cdot \text{dia}^{-1}$, operando com a pressão de topo de 500mmca . Foram realizadas 20 campanhas na chaminé dos *glendons* do referido AF de março de 2004 a novembro de 2010: efetuadas doze campanhas com o alto forno equipado com sistema a seco e oito campanhas com o sistema úmido.

Com o sistema a seco, a média das concentrações foi de $165,1\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$, tendo sido a mínima concentração de $86,4\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ e a máxima de $247,9\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ (**GRÁF. 06**).

Com a implantação do sistema úmido, verifica-se no gráfico 06 que a concentração média de partícula no gás foi de $56,0\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$, sendo que a concentração mínima foi de $18,8\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ e a máxima de $127,3\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$.

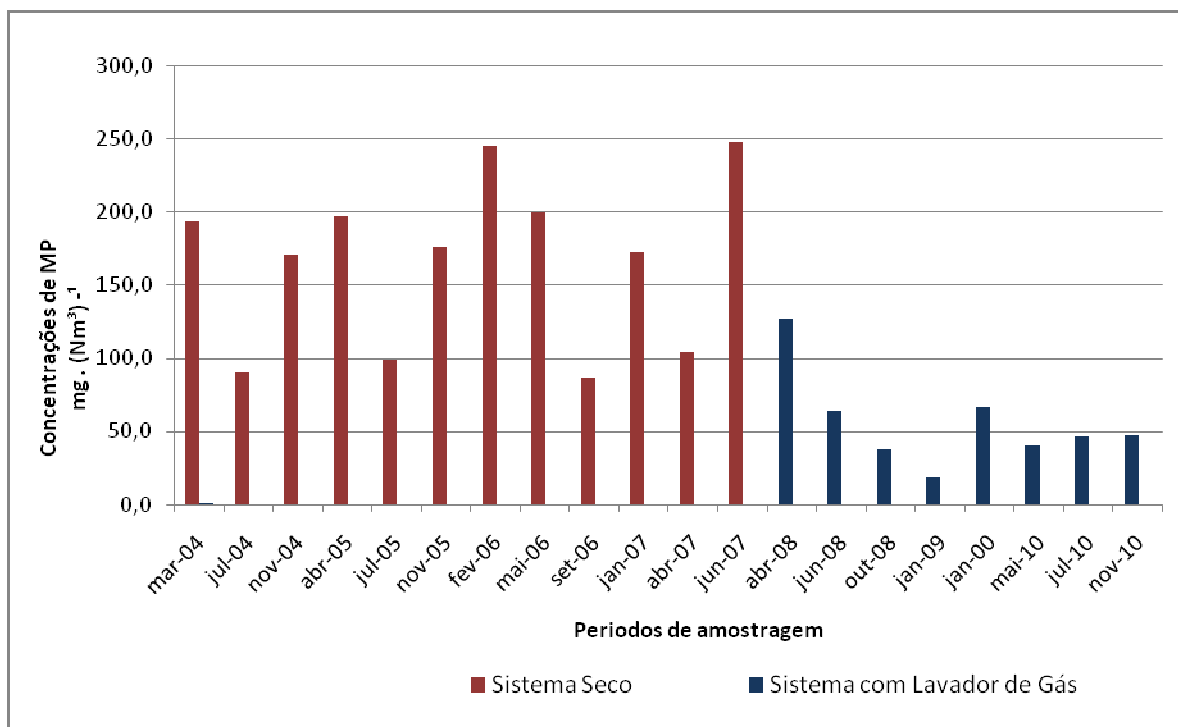


GRÁFICO 06 – Concentração de partículas no gás no AF – 06 (2004-2010).

Fonte: Próprio autor.

O alto-forno 07 tem um volume útil de 75m^3 e capacidade instalada de $180\text{t} \cdot \text{dia}^{-1}$, operando com a pressão de topo de 500mmca . Foram realizadas dezesseis campanhas na chaminé dos *glendons* do referido AF de setembro de 2003 a junho de 2008 com o sistema a seco. A partir de 2008, o AF parou para reforma e implantação de lavador de gases, tendo previsão de retorno para 2011.

A média das concentrações obtidas foi de $169,7\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$, tendo sido a mínima concentração de $96,9\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$ e a máxima de $238,8\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$, conforme apresentado no **GRÁF. 07**.

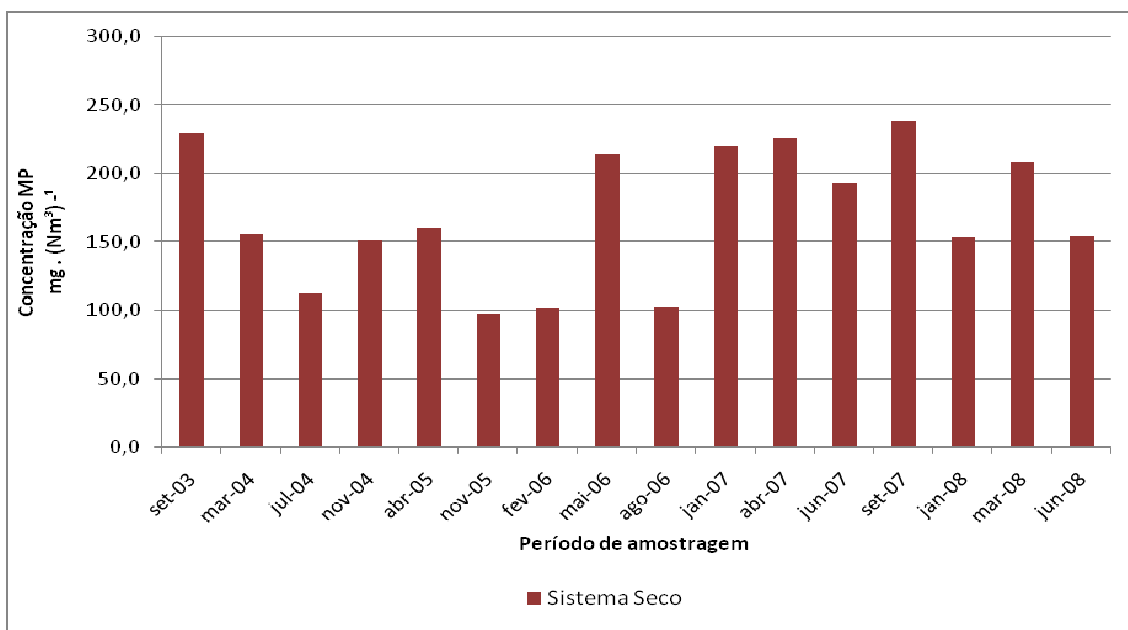


GRÁFICO 07 – Concentração de partículas no gás no AF – 07 (2003-2008).

Fonte: Próprio autor.

Para visualização dos resultados de emissão de material particulado em todos os altos-fornos estudados, constatou-se uma melhor eficiência de limpeza dos gases com o sistema a úmido. O AF-01 teve sua performance melhorada em 39%, o AF-02 em 47%, o AF-03 em 40%, o AF-04, em 54%, o AF-05 em 53% e o AF-06 em 66% conforme apresentado no **GRÁF. 08**.

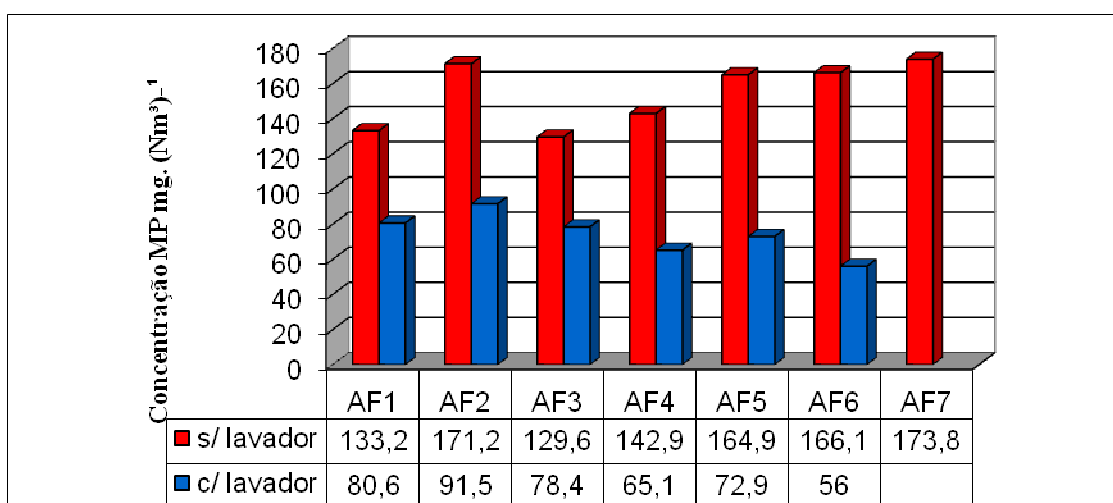


GRÁFICO 08 – Média das concentrações de MP em cada um dos altos-fornos.

Fonte: Próprio autor.

4.4 - Conclusão

O estudo comparativo do sistema de limpeza de gás a seco e a úmido, realizado no período de 2002 a 2010, na Metalsider Ltda., indicou melhoras substanciais na redução de material particulado das emissões atmosféricas dos altos-fornos quando da substituição do sistema a seco pelo sistema a úmido, podendo variar de 39% a 66% em função das campanhas realizadas nesta pesquisa para comparar os sistemas de limpeza dos gases adotados.

Na prática, tem-se observado que, para funcionamento adequado de uma termoelétrica, a concentração de partículas no gás deve ser inferior a $100\text{mg} \cdot (\text{Nm}^3)^{-1}$. Verifica-se, portanto, pelo **GRÁF. 08**, que todos os fornos com o sistema a úmido apresentaram concentrações inferiores a este valor, indicando ser a configuração mais adequada para a geração de energia elétrica de forma eficiente e atendimento aos padrões ambientais vigentes.

Desta forma, constata-se que a Metalsider Ltda. busca em suas práticas, adotar técnicas que não só cumprem a legislação vigente mas também aprimoram o gerenciamento ambiental para subsidiar as certificações neste setor.

Capítulo 5: Aproveitamento do resíduo pó do balão na indústria de cerâmica vermelha

5.1 – Introdução

Alguns resíduos sólidos da atividade siderúrgica, como os finos de carvão vegetal, de minério de ferro e pó de balão do sistema de limpeza de gases são obtidos no estado seco e, portanto, quando manuseados, ocorrem emissões consideráveis de material particulado. Os silos de estocagem e áreas situadas abaixo dos mesmos, onde os resíduos são despejados, seja em caçamba ou caminhão, devem ser enclausurados e contemplados com sistemas de exaustão.

Segundo OLIVEIRA & MARTINS (2003), os produtores independentes no estado de Minas Gerais geram de 28 a 45kg de pó de balão por tonelada de ferro-gusa, dependendo do processo e da eficiência do sistema de controle. A composição do material particulado, contido no pó de balão, varia com o processo produtivo e com as matérias-primas empregadas. A composição química típica do resíduo pó do balão coletor é 57% de Fe_2O_3 ; 12,0% de SiO_2 ; 2% de Al_2O_3 ; 0,05% P_2O_5 ; 3,0% CaO ; 0,1% MgO e carvão vegetal 20%

O setor industrial que mais aproveita os resíduos siderúrgicos é o cimenteiro, pois todos os resíduos gerados na produção do Ferro-gusa podem ser amplamente utilizados. Assim, cerca de 7% das siderúrgicas destinam finos de minério de Ferro para as cimenteiras, 31% enviam pó do balão, 63% destinam finos de carvão vegetal e 65% enviam escória (MALARD, 2009).

Já o segmento de cerâmica vermelha ou estrutural, compreende todos os produtos que apresentam cor vermelha após a queima, resultante da oxidação dos compostos de Ferro, presentes no pó do balão ou liberado pela argila, e utiliza, basicamente, argila como matéria-prima principal. Os produtos fabricados por esse setor são tijolos, blocos,

telhas, tubos, lajes para forro, lajotas, vasos ornamentais e agregados leve de argila expandida (JORDÃO & ZANDONADI, 2002).

Segundo SANTOS (1989), no Brasil, a indústria cerâmica é constituída por empresas de pequeno e médio porte, que utilizam, em sua grande maioria, tecnologia defasada, tanto em equipamentos quanto processos. O segmento é formado por aproximadamente 5.500 empresas, com faturamento anual de R\$ 6 bilhões, gerando 400 mil empregos diretos e 1,25 milhões de indiretos. A produção em 2005 foi de 63,6 bilhões de peças (o dobro de 2004) das quais 48 bilhões se referem a blocos e tijolos (75%) e 15,6 bilhões de telhas (15%) o que representa 4,8% da Indústria da Construção Civil, que perfaz 7,3% do PIB Nacional (ANICER, 2008).

5.1.2 - Matérias-primas da Indústria de Cerâmica Vermelha

As propriedades dos produtos queimados são dependentes das características das matérias-primas e de suas alterações durante o processo térmico. Para REED (1995), o conhecimento das características mais importantes do material está relacionado com a maneira de escolha e controle da matéria-prima. Desde a década de 70, observa-se que o beneficiamento pode, até certo ponto, ser a solução mais econômica para se melhorar a qualidade do produto (PELS-LEUSDEN, 1976).

A argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que forma quando misturada com água uma massa plástica, podendo ser trabalhada facilmente, conservando a forma atingida e, após a queima, torna-se resistente, térmica e mecanicamente. É constituída, essencialmente, por argilominerais, silicatos hidratados de Alumínio e Ferro ou Magnésio, contendo ainda certo teor de elementos alcalinos e alcalinos-terrosos que definem suas características e conseqüentemente, as propriedades cerâmicas (GRIM, 1962).

Segundo a NBR 6.502 (ABNT, 1995), as argilas são compostas por partículas de diâmetro inferior a 0,002mm, que apresentam plasticidade quando úmidas e, quando secas, formam torrões dificilmente desagregáveis manualmente.

A plasticidade em argilas é essencialmente resultante das forças de atração entre as partículas de argilominerais e a ação lubrificante da água entre as partículas, sendo influenciada por: granulometria e distribuição dos tamanhos e das formas de partículas (lamelares, granulares, arredondadas, etc.); presença de maior ou menor quantidade de água; presença ou não de matéria orgânica; presença de sais solúveis e/ou eletrólitos que interferem nas forças de atração (Van der Waals) entre as partículas; presença de impurezas minerais, como quartzo, mica, calcários e outros de granulometria geralmente mais grosseiras e que reduzem a plasticidade das argilas (JORDÃO & ZANDONADI, 1994; PRACIDELLI & MELCHIADES, 1997).

Para GOMES (1988), a alta resistência mecânica dos corpos de argila é dependente de maior teor, maior plasticidade e granulometria mais fina da argila. Quanto menor a dimensão e mais lamelar forem as partículas constituintes das argilas, maior será a superfície de contato entre elas e, conseqüentemente, mais alta será a resistência. O conhecimento da resistência mecânica após queima é importante para verificar se o produto final atenderá as especificações requeridas e também a temperatura de queima ideal (MINEROPAR, 2008).

A retração é a tendência que a argila tem em diminuir de volume pela perda de umidade por secagem e queima. Com a eliminação da água e o surgimento de espaços vazios por ela deixados ocorre uma aproximação das partículas, em consequência das forças de atração eletrostática, provocando o que se chama aglomeração ou adensamento. Para GRIM (1962), essa retração é diretamente proporcional à água de plasticidade e, em alguns argilominerais, a retração aumenta com a diminuição do tamanho das partículas. Para ISAAC ET AL. (2004), as argilas naturais têm normalmente retração ao ar de 2 a 8% e ao forno de 2,5 a 10%, podendo variar de acordo com o teor de umidade e os tipos de argila.

A utilização da mistura argila e pó do balão é possível considerando que ambas são constituídas de material inorgânico oxidado, mais Carbono, sendo compatível quimicamente com os argilominerais utilizados na produção de artigos de cerâmica vermelha. Os metais presentes no pó do balão podem ser incorporados na rede cristalina

do material cerâmico, sob condições de mistura e queima ideal, promovendo a imobilização de metais pesados, tornando o produto inerte em relação aos processos de lixiviação (ABNT, 2004b) e de solubilização (ABNT, 2004c), conforme as NBR 10.005:2004 e NBR 10.006:2004, respectivamente.

Pelos motivos expostos, este trabalho propõe verificar o aproveitamento potencial do pó do balão proveniente do sistema de limpeza dos gases na fabricação de produtos de cerâmica vermelha.

5.2 – Metodologia

A metodologia adotada neste estudo segue a instruções da Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM, conforme o Protocolo 024.483/2000, da Divisão DIMET de 04.08.2000.

5.2.1. – Caracterização dos resíduos estudados

A caracterização do resíduo pó do balão e da argila pura foi fundamental para conhecer as suas propriedades o que definiria a porcentagem de mistura viável para sua aplicação. Assim, a classificação dos resíduos quanto aos seus riscos potenciais ao ambiente foi determinada pela NBR 10.004:2004 (ABNT, 2004a). Observa-se que os ensaios de lixiviação (ABNT, 2004b) e os testes de solubilização (ABNT, 2004c) obedeceram as NBR 10.005:2004 e NBR 10.006:2004, respectivamente. Estes procedimentos analíticos foram desenvolvidos por AKVOS Laboratório Ambiental.

5.2.2. - Confeção do Molde

Os moldes (**FIG. 20**) foram confeccionados em um cilindro vazado de aço carbono, com uma altura de 9,1cm e diâmetro interno e externo de 5,1 e 7,6cm, respectivamente. Para fazer a compressão da mistura dentro do molde, foi utilizado um êmbolo de mesmo material com altura de 19,5cm e diâmetro igual a 5,0cm.



FIGURA 20 – Moldes de aço carbono para confecção dos corpos de prova.
Fonte: Próprio autor.

5.2.3. – Formulação da mistura

A escolha da proporção de mistura argila pura/pó do balão baseou-se em experiências realizadas anteriormente em siderúrgicas integradas a coque conforme relatórios técnicos desenvolvidos por esta equipe de trabalho, buscando a integração Universidade vs empresa como a Açominas e, na atual, Vallourec Mannesmann, registrado pela Fundação Christiano Ottoni visto a necessidade de sigilo para as técnicas desenvolvidas em que a proporção de 3% de resíduo semelhante, na massa cerâmica, apresentava o comportamento de não alterar a classificação do resíduo como não-inerte, classe II-A (ABNT, 2004a). Neste contexto, adotou-se a proporção de 3% do pó de balão a ser acrescida na massa o que apresenta ganhos ambientais relevantes, pois proporciona segurança em termos da inertização dos metais presentes no resíduo.

Assim, como mencionado, para a produção dos corpos de prova foi utilizado um tipo de argila, misturada na proporção de 97 partes de argila e três partes de pó do balão (**TAB. 04**). Observa-se que a água utilizada no preparo dos corpos de prova foi fornecida pela COPASA obtida diretamente da torneira sendo que a quantidade de água indicada (25mL) foi estabelecida através de testes de contato para definir melhor plasticidade, o que possibilitou a obtenção de uma massa cerâmica com plasticidade adequada para moldagem.

Tabela 04
Quantidade de cada componente presente nas misturas (100g).

argila	Componentes Pó do balão	Água
97	3	25ml

Fonte: Próprio autor.

5.2.4. - Preparação dos corpos de prova

A confecção dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Resíduos Sólidos, do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, sendo utilizado um único tipo de argila, coletada de forma representativa no depósito de Cerâmica, em Marabá (PA), em março de 2008, conforme proposto pela NBR 10.007:2004 (ABNT, 2004d).

Posteriormente, fez-se a secagem do material dispondo-o em bandejas de alumínio e levando-o à estufa, à temperatura de 105°C, por 24h. Ao resfriar, estando o mesmo compactado, promoveu-se a sua cominuição, através de britagem e de moagem e posterior peneiramento no Laboratório de Tratamento de minérios, do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.

As amostras de argila pura, já secas, foram novamente pesadas, determinando a umidade contida e armazenadas em recipientes de plástico (capazes de manter as propriedades e características do material). Foram devidamente identificadas para posterior adição à mistura, bem como envio de alíquota para análises laboratoriais para caracterização do resíduo através de ensaios de lixiviação (ABNT, 2004b) e solubilização (ABNT, 2004c).

Cerca de 5,0kg de pó do balão foram coletados, de maneira representativa em sua fonte geradora, isto é, na saída do coletor primário, na Siderúrgica Metalsider Ltda. (Betim/MG), por se tratar de uma siderúrgica não-integrada a carvão vegetal, cujo processo de obtenção de ferro-gusa é similar às usinas de mesma tipologia.

Para a preparação dos corpos de prova propriamente ditos, é necessário que, primeiramente, seja feita a pesagem dos componentes, conforme descrito na **TAB.04** e, em seguida, faz-se a sua mistura utilizando-se de recipiente plástico e espátula de madeira. Assim, promove-se a mistura inicial do material, de forma a estabelecer o primeiro contato dos componentes e, em seguida, adiciona-se os 25mL de água, aos poucos, mantendo a mistura contínua da massa.

Posterior à adição deste volume de água, continua-se com a mistura da massa, a fim de conseguir a homogeneização de todo o material. Nesta próxima etapa, realizou-se o enchimento dos moldes cilíndricos (**FIG. 20**) com a mistura, promovendo a compressão da massa moldada com o auxílio do êmbolo de mesmo material, de forma a evitar a presença de vazios e trincas após a secagem. Em seguida, faz-se a remoção do corpo de prova do molde, mantendo-o à temperatura ambiente por 24 horas. Os corpos de prova são então levados à estufa para secagem final, à temperatura de 105°C, por mais 24 horas. Os corpos de prova preparados (**FIG. 21a**) no Laboratório de Resíduos Sólidos do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG são então mantidos à temperatura ambiente até a realização da queima (**FIG. 21b**).



FIGURA 21 - Corpos de prova (a) antes da queima; (b) após a queima.
Fonte: Próprio autor.

5.2.5. – Queima dos corpos de prova

A queima dos corpos de prova foi efetuada a temperatura de 800°C, considerada temperatura de queima dos fornos cerâmicos. O critério para a escolha dessa

temperatura foi a permanência da mesma por aproximadamente 2 horas no interior dos tijolos.

A operação de queima dos corpos de prova com a proporção de 3% de pó do balão, além do corpo de prova sem adição do pó (argila pura), foi realizada em uma mufla, com temperatura controlada por termopares, com capacidade máxima de 1400°C. Assim, para que os choques térmicos e danos aos corpos de prova fossem evitados, a operação de queima foi realizada nas seguintes condições:

- 30 minutos a 200°C
- 30 minutos a 400°C
- 60 minutos a 600°C
- 120 minutos a 800°C (simulando perfil térmico característico).

Após atingir este período de queima, a mufla foi desligada, propiciando ao material perda gradativa de temperatura por 24 horas. Posteriormente, os corpos de prova foram retirados (**FIG. 22**) para análises laboratoriais de lixiviação (ABNT, 2004b) e solubilização (ABNT, 2004c), realizadas por AKVOS Laboratório Ambiental.



FIGURA 22 – Corpos de prova para ensaios de lixiviação e solubilização e Classificação dos Materiais.

Fonte: Próprio autor.

5.3 – Resultados e Discussão

O resíduo identificado como argila + 3% de pó de balão originário do processo produtivo da empresa Metalsider Ltda. (Betim/MG), de acordo com a NBR 10.004/2004, apresenta as seguintes características: corpos de prova de coloração alaranjada (cor de terra) com 100% de sólidos totais e resultado negativo para inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade conforme apresentado na **TAB. 05** que são ensaios que permitem enquadrar o resíduo na classe 1 (ABNT, 2004a). Resultados semelhantes foram obtidos também para a argila pura coletada em Marabá (PA).

Tabela 05

Ensaio para avaliar se os resíduos estudados pertencem à Classe I.

Característica avaliada	Resultado	Referência
Inflamabilidade	Negativo	NBR10004: 2004 (item 4.2.1.1)
Corrosividade	Negativo	NBR10004: 2004 (item 4.2.1.2 a)
Reatividade	Negativo	NBR10004: 2004 (item 4.2.1.3)
Toxicidade	Negativo	NBR10004: 2004 (item 4.2.1.4 a)
Patogenicidade	Negativo	NBR10004: 2004 (item 4.2.1.5.1)

Como resultados do ensaio de lixiviação prescritos pela NBR10.005 (ABNT, 2004b), constatou-se que o resíduo argila + 3% de pó de balão apresenta o lixiviado com pH igual à 4,93 enquanto a argila pura, equivalente ao pH=4,95, ambas com aspecto cristalino. Além disso, verificou-se que o pH do extrato lixiviado foi igual a 7,83 para o resíduo argila + 3% de pó de balão e de 7,61 para a argila pura, conforme item 5.1.3 da NBR10.005:2004. Após a adição de solução HCl 1N, observaram-se pH igual a 2,04 para o resíduo argila + 3% de pó de balão e de 2,01 para a argila pura. Ressalta-se que a solução de extração utilizada foi a n°1 cujo pH da solução de extração é 4,95 e o tempo de agitação foi de 18h a 30rpm.

Tanto para o resíduo, argila + 3% pó do balão, quanto para a argila pura, as concentrações de Arsênio, Cádmiio, Chumbo, Cromo total, Fluoreto, Mercúrio, Prata,

Selênio no extrato lixiviado apresentaram resultados semelhantes com concentrações inferiores às prescritas no Anexo F: Concentração – Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação da NBR 10004:2004 (ABNT, 2004a) conforme detalhado na **TAB. 06**. Ressalta-se que apenas a concentração de Bário apresentou-se ligeiramente maior para a argila pura (0,753 mg Ba.L⁻¹) quando comparada ao resíduo de argila + 3% do pó do balão (0,632 mg Ba.L⁻¹) (**TAB. 06**).

Tabela 06

Resultados dos ensaios realizados nos extratos lixiviados dos resíduos estudados.

Parâmetro	Unidade	Argila pura	argila +3% pó do balão	Limite de referência*
Arsênio	mg As.L ⁻¹	<0,01	<0,01	1,0
Bário	mg Ba.L ⁻¹	0,753	0,632	70,0
Cádmio	mg Cd.L ⁻¹	<0,01	<0,01	0,5
Chumbo	mg Pb.L ⁻¹	<0,05	<0,05	1,0
Cromo total	mg Cr.L ⁻¹	<0,05	<0,05	5,0
Fluoreto	mg F.L ⁻¹	<0,10	<0,10	150,0
Mercúrio	mg Hg.L ⁻¹	<0,0002	<0,0002	0,1
Prata	mg Ag.L ⁻¹	<0,01	<0,01	5,0
Selênio	mg Se.L ⁻¹	<0,01	<0,01	1,0

Fonte: (*) ABNT, 2004a.

Para avaliar se o resíduo pertence à Classe II-A (Não Inerte) ou à Classe II-B (Inerte) foram realizados os ensaios de solubilização conforme a NBR10.006 (ABNT, 2004c). O resíduo, argila +3% pó do balão, apresentou no ensaio de solubilização aspecto líquido incolor, sendo que o pH do extrato solubilizado foi de 6,53 e 6,31 para a primeira e segunda repetição respectivamente. Já para o aspecto da argila pura foi constatado líquido de coloração ligeiramente amarelada cujo pH foi de 6,49 para a primeira repetição e pH=6,33 para a segunda.

Tanto para o resíduo, argila + 3% pó do balão, quanto para a argila pura, as concentrações de Alumínio, Cádmio, Chumbo, Cianeto, Cobre total, Cromo total, Fenóis totais, Ferro, Manganês, Mercúrio, Nitrato, Prata, Selênio, Sulfato e Zinco nos extratos solubilizados apresentaram resultados semelhantes entre as amostras com concentrações inferiores às prescritas no Anexo G: Padrões para o ensaio de solubilização NBR 10.004:2004 (ABNT, 2004a) conforme detalhado na **TAB. 07**.

Para o Bário, constatou-se que as amostras de argila + 3% pó do balão apresentaram concentrações ligeiramente superiores tanto para a amostra 1 (0,069mg Ba.L⁻¹) quanto para a amostra 2 (0,070mg Ba.L⁻¹) e, para a argila pura, concentrações de 0,049mg Ba.L⁻¹ e 0,046mg Ba.L⁻¹ para cada uma das amostras. Resultados com concentrações inferiores ao proposto no Anexo G (ABNT, 2004a).

Apesar das concentrações de Cloreto, Fluoreto e Sódio serem inferiores ao ANEXO G, verificou-se que as amostras de argila + 3% pó do balão apresentaram concentrações superiores às amostras de argila pura conforme os dados apresentados na **TAB. 07**.

Tabela 07

Resultados dos ensaios realizados nos extratos solubilizados dos resíduos estudados.

Parâmetro	Unidade	argila + 3% pó do balão		argila pura		Limite de referência*
		Amostra 01	Amostra 02	Amostra 01	Amostra 02	
Alumínio	mg Al.L ⁻¹	<0,1	0,1	<0,1	0,1	0,2
Arsênio	mg As.L ⁻¹	0,04	0,04	0,04	0,04	0,01
Bário	mg Ba.L ⁻¹	0,069	0,070	0,049	0,046	0,7
Cádmio	mg Cd.L ⁻¹	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,005
Chumbo	mg P. L ⁻¹	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Cianeto	mg CN.L ⁻¹	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,07
Cloreto	mg Cl.L ⁻¹	2,66	2,66	2,13	2,39	250,0
Cobre total	mg Cu.L ⁻¹	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	2,0
Cromo total	mg Cr.L ⁻¹	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05
Fenóis totais	mg.L ⁻¹	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01
Ferro	mg Fe.L ⁻¹	0,16	0,15	0,16	0,16	0,3

Parâmetro	Unidade	argila + 3% pó do balão		argila pura		Limite de referência*
		Amostra 01	Amostra 02	Amostra 01	Amostra 02	
Fluoreto	mg F.L ⁻¹	0,43	0,40	0,21	0,26	1,5
Manganês	mg Mn.L ⁻¹	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,1
Mercúrio	mg Hg.L ⁻¹	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,001
Nitrato	mg N.L ⁻¹	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	10,0
Prata	mg Ag.L ⁻¹	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05
Selênio	mg Se.L ⁻¹	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
Sódio	mg Na.L ⁻¹	4,98	6,32	3,51	3,35	200,0
Sulfato	mg SO ₄ ²⁻ .L ⁻¹	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	250,0
Zinco	mg Zn.L ⁻¹	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	5,0

Fonte: (*) ABNT, 2004a.

Com base nos ensaios realizados, verificou-se que o resíduo identificado como argila pura e aquele identificado como argila + 3% pó do balão ambos são classificados como Resíduo Classe II-A – Não Inerte, uma vez que a substância Arsênio (**TAB. 07**) foi solubilizada em concentração acima dos valores máximos estabelecidos no Anexo G – Padrões para o ensaio de solubilização da NBR 10.004:2004 conforme (ABNT, 2004a).

5.4 - Conclusão

O estudo comparativo dos resíduos, argila pura e argila + 3% pó do balão obtido no processo siderúrgico da empresa Metalsider Ltda classificou-os como Resíduo Classe II-A – Não Inerte visto os ensaios de lixiviação e solubilização realizados.

Na prática, tem-se observado que a utilização de argila + 3% pó do balão apresenta resultado semelhante quando se utiliza a argila pura na indústria de cerâmica. A associação do pó do balão à argila é extremamente adequada, pois diminui o uso de um recurso natural finito, possibilitando o aproveitamento de um resíduo industrial e evitando descartá-lo no ambiente. Desta maneira, constatou-se que este processo está em consonância não só com os padrões ambientais vigentes, mas também com a

qualidade do produto a ser ofertado para o mercado que mantém as suas características comerciais.

Capítulo 6: Conclusões gerais

Em relação às emissões atmosféricas, conforme apurado através das campanhas realizadas nos sete altos-fornos, observou-se que o sistema de limpeza que utiliza o lavador tipo Venturi apresentou concentrações de material particulado inferiores aos dos mesmos altos-fornos, quando dotados do sistema de balão a seco. Exceção é feita ao AF-7 que não implantou o sistema de lavagem. Observou-se também que a menor concentração de material particulado, obtida nos altos-fornos analisados, foi relativa ao sistema úmido.

Tais estudos podem auxiliar no gerenciamento ambiental das usinas não integradas de ferro-gusa, onde o gás do alto-forno, devido ao seu poder calorífico, em um grau de limpeza adequado, propicia a conformidade com os padrões ambientais de poluentes atmosféricos em fontes estacionárias, bem como seu aproveitamento eficiente na geração de energia elétrica.

Considerando o estudo realizado e objetivando o aproveitamento do resíduo sólido gerado no sistema de gases do alto-forno, verificou-se que a adição de 3% do resíduo pó do balão na argila não altera as características químicas dos materiais analisados, conforme as normas técnicas da ABNT para resíduos sólidos industriais.

Capítulo 7: Contribuições originais ao conhecimento

A atividade siderúrgica é dominada pelo homem há séculos. A descoberta do Ferro e, posteriormente o aço, possibilitaram o desenvolvimento da civilização humana até os dias atuais. A partir da década de 50, iniciou-se no Brasil o processo de industrialização e, portanto, a necessidade do Ferro e do aço para a concretização desta meta.

As grandes siderúrgicas integradas, que produzem ferro-gusa e, posteriormente, o aço utilizam grandes reatores, chamados altos-fornos que empregam como energético e, ou, redutor o carvão mineral que é a fonte do coque. As siderúrgicas não-integradas utilizam necessariamente o carvão vegetal.

Devido ao tamanho dos altos-fornos na indústria integrada, os gases gerados no processo de redução conferem uma pressão no topo dos altos fornos que permitem otimizar o sistema de limpeza dos gases ao patamar de concentração de cerca de $5,0\text{mg.Nm}^{-3}$. Nos altos-fornos, com capacidade limitada a 400 ton.dia^{-1} de gusa, o redutor e energético é o carvão vegetal, que devido ao volume reduzido dos altos-fornos, apresentam resistência mecânica satisfatória.

Salienta-se que o Brasil é um dos poucos países, exceção do Paraguai, que produz o ferro-gusa a carvão vegetal. Devido ao tamanho e à capacidade de produção, os gases gerados no topo dos altos-fornos do setor independente são caracterizados por baixa pressão e, portanto, limitando a eficiência dos sistemas de limpeza dos gases empregados. Parte fundamental da cadeia produtiva do aço é possível afirmar que os produtores independentes de ferro-gusa de Minas Gerais, principal pólo desta matéria-prima no Brasil, empregam os mesmos princípios de limpeza da siderurgia integrada limitado, no entanto, pela baixa pressão dos gases.

Assim sendo, a maioria das unidades independentes utilizam sistema a seco composto de balão coletor, ciclones e multiciclones, devido à baixa pressão dos gases do topo do alto-forno. Algumas unidades empregam sistema úmido composto de balão coletor

precedido por lavador de gases de baixa pressão necessitando de água como meio de lavagem e gerando material particulado, retido no sistema na forma de lama. A utilização destes lavadores foi preterida pelos empreendedores devido ao maior custo desta operação, envolvendo tratamento da lama e da água utilizada neste processo de limpeza. Além disso, foi observado, em levantamentos no órgão ambiental, que o sistema a seco atinge valores de concentração de emissão de particulados que permite o enquadramento das fontes em conformidade com os parâmetros previstos na legislação vigente. Assim, parece evidente que o sistema úmido apresenta vantagens na limpeza dos gases, apesar dos levantamentos realizados pelo órgão ambiental através de programas de auto-monitoramento sugerirem que o sistema a seco apresenta o mesmo rendimento de limpeza do que o sistema úmido.

Ressalvas quanto a essa afirmativa foram observadas por técnicos do órgão ambiental (FEAM) que a mesma não procedia através de simples observações visuais quando comparados os dois sistemas. Assim, visando identificar eventuais falhas nos programas de auto-monitoramento, foi proposta a presente tese com o intuito de demonstrar ao setor que o procedimento de lavagem dos gases é mais apropriado, pois proporciona maior limpeza e possibilidade de aproveitamento dos gases. Por outro lado, o sistema de limpeza mais eficiente, acarreta maior geração de resíduos sólidos, especificamente, o pó do balão. Através desta observação, foi conveniente o desenvolvimento do estudo apresentado no capítulo de resíduos sólidos visando seu aproveitamento na indústria de cerâmica vermelha.

Em suma, a tese propiciou dados confiáveis sobre a emissão de particulado nos altos-fornos utilizando o sistema a seco e, posteriormente, o sistema a úmido para o mesmo alto-forno. Este conhecimento é de fundamental importância na escolha do equipamento de proteção ambiental adequado para a limpeza dos gases de altos fornos de pequena capacidade a carvão vegetal cuja permanência do setor no mercado será determinada, entre outros fatores, pela geração de energia elétrica advinda do gás do alto-forno.

Capítulo 8 - Relevância dos resultados

Após várias tentativas no passado, a Deliberação Normativa COPAM n°49/2001 foi propulsora da regularização ambiental do setor do ferro-gusa em Minas Gerais. Decorridos oito anos de sua vigência, foi possível a realização de trabalhos conjuntos sobre a tipologia, sendo apontadas inconsistências nas concentrações de material particulado emitidos pelas fontes estacionárias dos altos-fornos.

No intervalo de 2002 – 2010 foi possível avaliar a substituição dos sistemas de limpeza dos gases visando controlar as emissões das indústrias do setor. Os resultados apurados demonstram que a implantação de lavadores nos altos-fornos apresentou a retenção da concentração de material particulado mais eficiente. Esta constatação subsidia decisão técnica sobre o sistema de limpeza de gás mais adequado visando o seu enquadramento na legislação e, fundamentalmente, proporcionando maior eficiência no aproveitamento energético.

Quanto ao resíduo sólido, fundamentalmente o estudo desenvolvido demonstrou que o pó do balão pode ser aproveitado com possíveis ganhos energéticos e preservando recursos naturais, garantindo a sustentabilidade ambiental das usinas siderúrgicas não-integradas a carvão vegetal. Sugere-se, através deste estudo, a formação de um grupo de trabalho visando a criação da deliberação normativa específica para o aproveitamento do pó do balão.

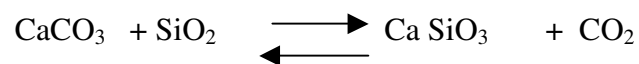
Capítulo 9: Sugestões para trabalhos futuros

A otimização do sistema de limpeza do gás de alto-forno para a produção de energia elétrica na unidade produtiva de ferro-gusa acarretará em maior geração de resíduos sólidos.

Estudos podem ser desenvolvidos com o objetivo de reaproveitar estes materiais como condicionante do solo e também como aditivo para cerâmica vermelha.

A utilização de minério com menor conteúdo de Ferro, devido ao preço e à disponibilidade do mercado, resulta numa maior geração de escória nos altos-fornos, devido ao maior grau de impurezas no minério. Sendo a geração de escória, a principal fonte de resíduos sólidos da siderurgia não-integrada seria conveniente o desenvolvimento de estudos visando incorporar maior valor agregado a este produto.

Atualmente, a escória tem utilização principal na indústria de cimento. Na formação da escória, devido a presença de carbonato de cálcio (CaCO_3) e sílica (SiO_2) presente, condição de pressão e temperatura (1540°C) ocorre a seguinte reação no interior do alto-forno:



O silicato de cálcio citado é conhecido mineral denominado Wollastonita. Este mineral tem aplicações diversas entre elas como fundente na indústria cerâmica, na formulação de esmaltes (vidrados) melhorando o intervalo de fusão e brilho. Tem utilização também como fertilizante sendo uma fonte eficiente na liberação de Si para culturas perenes, como arroz. Existem relatos que no Sudoeste da China foram produzidos milhares de toneladas de papel com a Wollastonita como material básico. A Wollastonita pode ser reduzida a um pó muito fino para servir de polpa em fábrica de papel de qualquer natureza.

Referências Bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:** Rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 18p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a. 71p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005:** Lixiviação de resíduos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b. 16p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006:** Solubilização de resíduos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c. 3p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007:** Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004d. 47p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10700:** Planejamento de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias. Rio de Janeiro: ABNT, 1989a. 7p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10701:** Determinação de pontos de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias. Rio de Janeiro: ABNT, 1989b 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10702:** Determinação da massa molecular base seca. Rio de Janeiro: ABNT, 1989c. 6p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11966:** Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação da velocidade e vazão. Rio de Janeiro: ABNT, 1989d. 7p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11967:** Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da umidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1989e. 7p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12019:** Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação material particulado. Rio de Janeiro: ABNT, 1990. 11p.

ALCARDE, J. C.. **Corretivo de acidez dos solos:** características e interpretações técnicas. São Paulo: ANDA, 2005. 24p. (ANDA, Boletim técnico, n.6).

ALMEIDA, M. L. B.. **Alternativas de uso e aplicações dos resíduos sólidos das indústrias independentes de produção de Ferro-gusa do estado de Minas Gerais.** 2001. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos)- Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2001.

ANDRADE, M. L. A. et al.. **Ferro-gusa: metálico alternativo**. Rio de Janeiro: BNDES, 2003. 41p. (BNDES Boletim Setorial). Disponível em <http://www.bndes.gov.br/conhecimento/setorial/is_g3_41.pdf> Acesso em 15. mar. 2009.

ANICER – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. Dados do setor. Disponível em:<[www .anicer.com.br/dados.htm](http://www.anicer.com.br/dados.htm)>. Acesso em 20 ago. 2008.

ARAÚJO, L. A.. **Manual de Siderurgia: produção**. 2ed. São Paulo: Arte & Ciência, 1996. v.1. 468p.

BATISTA, A. A. M.. **Utilização do gás de alto-forno para produção de energia na indústria siderúrgica de Minas Gerais**. 2009. 160p. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade Sócio-econômica e Ambiental)-Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2009.

BATISTA, A. A. M.; FIGUEIREDO, D. V.. As emissões atmosféricas em Minas Gerais. In.: MINAS GERAIS. **Pesquisa tecnológica para controle ambiental em unidades independentes de produção de Ferro-gusa**. Belo Horizonte: CDTN/CETEC/FEAM/UFMG, 1998. v.1 – Diagnóstico, p.56-62. 104p.

BATTAGIN, A. F.. **Panorama do uso da escória granulada de alto-forno na indústria brasileira de cimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998. 28p.

BENJAMIN, J. O.. **Comentários sobre o levantamento das indústrias não integradas de Ferro-gusa**. Belo Horizonte: FEAM, 2006. 25p.

BENQUERER, R. A.. **Gerenciamento de resíduos sólidos em siderúrgicas integradas a coque**. 2000. 225p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2000.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/sgm/>> Acesso em 12. dez.2009

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/sgm/>> Acesso em 15. mar.2010.

CASTRO, L. F. A.. O processo de produção. In.: MINAS GERAIS. **Pesquisa tecnológica para controle ambiental em unidades independentes de produção de Ferro-gusa**. Belo Horizonte: CDTN/CETEC/FEAM/UFMG, 1998. v.1 – Diagnóstico, p.28-55. 104p.

CASTRO, L. F. A.; CASTRO, B. A. C.; GOMES, A. M.; JACOMINO, V. M. F.; RIBEIRO, E. D. L.. Estudo das potencialidades de utilização da escória de alto-forno a carvão vegetal na pavimentação. In: 57º Congresso Anual da ABM Internacional, 2002, São Paulo. **Anais do 57º Congresso Anual da ABM Internacional**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002a. p.1249-1258.

CASTRO, L. F. A.; ROCHA, S. H. F. S.; RIBEIRO, E. D. L.; JACOMINO, V. M. F.; LOPES, L. E. F.. Aproveitamento de resíduos gerados na limpeza dos gases de alto-forno através da briquetagem. In: 57º Congresso Anual da ABM Internacional, 2002, São Paulo. **Anais do 57º Congresso Anual da ABM Internacional**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002b. p.1239-1248.

CASTRO, L. F. A.; SOUZA, C. M.; SILVA, C. S. W ; JACOMINO, V. M. F.; RIBEIRO, E. D. L.; LIMA, M. S. M.. Caracterização de escória da produção de Ferro-gusa a carvão vegetal para uso agrícola. In: 57º Congresso Anual da ABM Internacional, 2002, São Paulo. **Anais do 57º Congresso Anual da ABM Internacional**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002c. p.1259-1267.

CASTRO, L. F. A.; TAVARES, R. P.; RIBEIRO, E. D. L.; JACOMINO, V. M. F.; LOPES, L. E. F.. Operação adequada de um alto-forno a carvão vegetal visando uma menor geração de carga poluidora. In: 56º Congresso Anual da ABM Internacional, 2001, Belo Horizonte. **Anais do 56º Congresso Anual da ABM Internacional**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001. p.1324-1332.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº382 de 26 de dez. de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. **Diário Oficial da União**, nº1, Seção 1, Brasília, 02 jan. 2007. p.131.

COPAM - CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Deliberação Normativa COPAM nº15 de 26 de fev. de 1996. Altera o Anexo II da Deliberação Normativa nº 01/90 de 04 de abril de 1990. **Diário Oficial do Estado**, Minas Gerais, 26 de fev. de 1996.

COPAM - CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Deliberação Normativa COPAM nº49 de 28 de set. de 2001. Dispõe sobre o controle ambiental das indústrias não-integradas de produção de Ferro-gusa no estado de Minas Gerais. **Diário Oficial do Estado**, Minas Gerais, 28 de set. 2001.

ENERGÉTICA – QUALIDADE DO AR. **Perfil de equipamento: CIPA** – coletor isocinético de poluentes atmosféricos. ENERGÉTICA, 2009. Disponível em <<http://www.energetica.com.br>> Acesso em 27. mar. 2009.

GEYER, R. M. T.; MASUERO, A. B.; MOLIN, D. C. C.; VILELA, A. C. F.. **Escórias siderúrgicas: caracterizações e aplicações para a construção civil**. In: 25º Seminário de Redução e de Matérias – Primas Siderúrgicas, 1994, Volta Redonda. Anais Seminário de Redução e de Matérias – Primas Siderúrgicas, 1994. P.363-381.

GOMES, C. F.. **argilas o que são e para que servem**. LISBOA: Fundação Cal Gulbenkian, 1988. 457p.

GRIM, R. E.. **Applied clay mineralogy**. Nova York: McGraw-Hill, 1962. 422p.

ISAAC, R. L. et al.. **Projeto beta-** Uso do lodo de estação de tratamento de água na construção civil: relatório final. Campinas, 2004. 204p.

JACOMINO, V. M. F. et al. **Controle Ambiental das indústrias de Ferro-gusa em altos fornos a carvão vegetal.** Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente/ SEGRAC, 2002a. 302p.

JACOMINO, V. M. F.; BATISTA, A. A. M.; RIBEIRO, E. D. L.; CASTRO, L. F. A.. Estudo técnico e econômico para avaliação de projetos de controle da poluição atmosférica. In: 56º Congresso Anual da ABM Internacional, 2001, Belo Horizonte. **Anais do 56º Congresso Anual da ABM Internacional.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001. p.1536-1546.

JACOMINO, V. M. F.; PEGO, V.; BATISTA, A. A. M.; RIBEIRO, E. D. L.; CASTRO, L. F. A.; LOPES, L. E. F.; BATISTA, W.. Diagnóstico do gerenciamento de resíduos sólidos gerados em unidades independentes de produção de Ferro-gusa de Minas Gerais. In: XXX Seminário de Redução de minério de Ferro da ABM, 1999, Belo Horizonte. **Anais XXX Seminário de Redução de minério de Ferro da ABM.** São Paulo: ABM, 1999. p 233-243.

JACOMINO, V. M. F.; RIBEIRO, E. D. L.; CASTRO, L. F. A.. Seleção de padrões de emissão atmosférica. Um estudo de caso para as pequenas e médias empresas produtoras de Ferro-gusa do Estado de Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.7, n.4, p.112-116, 2002b.

JACOMINO, V. M. F.; RIBEIRO, E. D. L.; CASTRO, L. F. A.; BATISTA, A. A. M.. Uso de escória de alto-forno: alternativas para melhoria da qualidade ambiental. In: XXXI Seminário de Redução de minério de Ferro da ABM, 2000, SANTOS. **Anais XXXI Seminário de Redução de minério de Ferro da ABM.** São Paul : ABM, 2000. p.97-108.

JORDÃO, M. A. P.; ZANDONADI, A. R.. **Curso de matéria primas.** Blumenau: ABC, 1994. 45p. parte I.

JORDÃO, M. A. P.; ZANDONADI, A. R.. Informação técnica. In: **ABC-Associação Brasileira de Cerâmica.** Anuário Brasileiro de Cerâmica. São Paulo, 2002, p.26-64.

LIMA, M. S. M.; SOUZA, C. M.; CASTRO, L. F. A.; JACOMINO, V. M. F.; RIBEIRO, E. D. L.; ROSADO, V. B.. Avaliação das características agronômicas do pó-de-balão gerado no sistema de limpeza de gás do alto-forno a carvão vegetal. In: XXXIII Seminário de Redução de minério de Ferro e Matérias-Primas, 2003, Ouro Preto. **Anais do XXXIII Seminário de Redução de minério de Ferro e Matérias-Primas.** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003. p.60-69.

LISBOA, H. M.; SCHIRMER, W. N.. **Controle da Poluição Atmosférica.**Santa Catarina: Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2008. 91p.

LORA, E. E. S.. **Prevenção e controle da poluição nos setores energéticos, industriais e de transporte**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 481p.

MALARD, A. A. M.. **Avaliação do aproveitamento dos resíduos sólidos gerados nas indústrias siderúrgicas não-integradas a carvão vegetal do município de Sete Lagoas estado de Minas Gerais**. 2008. 70p. Monografia (Especialização em Engenharia Sanitária e Meio Ambiente)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

MALARD, A. A. M.. **Avaliação ambiental do setor de siderurgia não-integradas a carvão vegetal do estado de Minas Gerais**. 2009. 174p. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade Sócio-econômica e Ambiental)-Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

MINAS GERAIS. Lei nº18.031/2009. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial do Estado, Diário do Executivo**, Minas Gerais, 13 de jan. 2009.

MINEROPAR – MINERAIS DO PARANÁ S.A. **Rochas, minerais e minérios**. Disponível: <<http://www.pr.gov.br/mineropar/htm/rocha/argila.html>>. Acesso em 08. fev. 2008.

MINITEC – MINITECnologias. **Perfil de equipamento: mini alto-forno**. MINITEC, 2005. 13p. Disponível em: <http://www.MINITECnologias.com.br/downloads/mbf-pt_16-07-09.pdf>. Acesso em 27. mar. 2009.

OLIVEIRA, M. R. C.; MARTINS, J.. Caracterização e classificação do resíduo “pó do balão”, gerado na indústria não-integrada a carvão vegetal: estudo de um caso na região de Sete Lagoas/MG. **Química Nova**. São Paulo, v.26, n.1, jan.2003.

PELS-LEUSDEN, C. O.. Verbesserung der Eigenschaften von Ziegeltonen durch die Aufbereitung. **Ziegelindustrie**, n.6, p.223-233, 1976.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G.. Importância da composição granulométrica de massas cerâmicas para cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v.2, n.1/2, p.31-35, jan./abr., 1997.

REED, J.S. **Principles of ceramic processing**. 2ed. New York, Jonh Wiley, 1995. 658p.

RIBEIRO, E. D. L.; CASTRO, L. F. A.; JACOMINO, V. M. F.; BATISTA, A. A. M.; VASCONCELOS, W.; FIGUEIREDO, D.. Controle ambiental de efluentes atmosféricos e líquidos gerados pela unidades independentes de produção de Ferro-gusa de Minas Gerais. In: XXX Seminário de Redução de minério de Ferro da ABM, 1999, Belo Horizonte. **Anais XXX Seminário de Redução de minério de Ferro da ABM**. São Paulo: ABM, 1999. p.385-395.

RIBEIRO, E. D. L.; CASTRO, L. F. A.; TAVARES, R. P.. Água na Siderurgia. **Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.558, n.60, p.453-455, 2005.

RIBEIRO, E. D. L.; JACOMINO, V. M. F.; CASTRO, L. F. A.; BATISTA, A. A. M.. Efluentes atmosféricos: o estado da arte do ponto de vista do controle ambiental nas unidades independentes de produção de Ferro-gusa de Minas Gerais. In: 55º Congresso Anual da ABM, 2000, Rio de Janeiro. **Anais do 55º Congresso Anual da ABM**. São Paulo: ABM, 2000. p.676-686.

ROCHA, S. H. F. S.; CASTRO, L. F. A.; RIBEIRO, E. D. L.; JACOMINO, V. M. F.; LOPES, L. E. F.; WIRTGEN, C.. Análise dos briquetes gerados na limpeza dos gases de alto-forno. In: 58º Congresso Anual da ABM, 2003, Rio de Janeiro. **Anais do 58º Congresso Anual da ABM**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003. p.118-127.

SANTOS, L. M. M.. **Siderurgia para cursos tecnológicos**. Ouro Preto, ETFOP, 2007. v. 1000. 154p.

SANTOS, P.S.. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2 ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1989. v.1.

SGM – SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL. Anuário Estatístico: Setor de Transformação de Não-Metálicos/Secretaria de Geologia, mineração e transformação mineral. Brasília, SGM, 2006. 60p.

SOUZA, C. M. et al.. **Uso agrícola do pó do balão e da lama do sistema de limpeza de gases de altos fornos a carvão vegetal**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 130p. (UFV, Relatório de Pesquisa).

SOUZA, C. M.; SILVA, C. S. W.; LIMA, M. S. M.; JACOMINO, V. M. F.; CASTRO, L. F. A.; RIBEIRO, E. D. L.. Caracterização de escória da produção de Ferro-gusa a carvão vegetal para uso agrícola. **Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.59, n.530, p.03-08, 2003a.

SOUZA, C. M.; SILVA, C. S. W.; LIMA, M. S. M.; JACOMINO, V. M. F.; CASTRO, L. F. A.; RIBEIRO, E. D. L.. Efeito do uso de escória siderúrgica em substituição ao Calcário agrícola sobre a cultura de cana de açúcar. In: 58º Congresso Anual da ABM, 2003, Rio de Janeiro. **Anais do 58º Congresso Anual da ABM**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003b. p.1398-1406.

SINDIFER – SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DO FERRO DE MINAS GERAIS **Dados gerais**. Disponível: <http://www.sindifer.com.br>. Acesso em: 08 de fevereiro de 2010.

VASCONCELOS, J. A. Rotas de processo para concentração de rochas itabiríticas da Mina Lagoa das Flores, Itatiaiuçu, MG. 2011. 184p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Universidade Federal de Minas Gerais.

Publicações do autor relacionadas com o trabalho

} *Prêmios e Títulos* *Categoria – Meio ambiente*

- 2004 - Prêmio Voest Alpine, ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.
- 2003 - Prêmio Voest Alpine, ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.
- 2000 - Prêmio Voest Alpine, ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.

} *Artigos completos publicados em periódicos*

- RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; CASTRO, L. F. A.; TAVARES, R. P.. Água na Siderurgia. **Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.558, n.60, p.453-455, 2005.
- SOUZA, C. M.; SILVA, C. S. W.; LIMA, M. S. M.; JACOMINO, V. M. F.; CASTRO, L. F. A.; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite. Caracterização de escória da produção de Ferro-gusa a carvão vegetal para uso agrícola. **Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.59, n.530, p.03-08, 2003.
- JACOMINO, V. M. F.; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; CASTRO, L. F. A.. Seleção de padrões de emissão atmosférica. Um estudo de caso para as pequenas e médias empresas produtoras de Ferro-gusa do Estado de Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.7, n.4, p.112-116, 2002.

} *Livros publicados/organizados ou edições*

- CASTRO, L. F. A.; JACOMINO, V. M. F.; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; LEÃO, M. M. D.; SOUZA, C. M.; GOMES, A. M.; ALMEIDA, M. L. B.; LOPES, L. E. F.. **Controle Ambiental das Indústrias de Ferro-gusa em Altos-Fornos a Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente/ Segrac Editora e Gráfica, 2002. 302 p.

} *Trabalhos completos publicados em anais de congressos*

- ROCHA, S. H. F. S.; CASTRO, L. F. A.; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; JACOMINO, V. M. F.; LOPES, L. E. F.; WIRTGEN, C.. Análise dos briquetes gerados na limpeza dos gases de alto-forno. In: 58º Congresso Anual da ABM, 2003, Rio de Janeiro. **Anais do 58º Congresso Anual da ABM**. São Paulo : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003. p.118-127.
- SOUZA, C. M.; SILVA, C. S. W.; LIMA, M. S. M.; JACOMINO, V. M. F.; CASTRO, L. F. A.; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite. Efeito do uso de escória

siderúrgica em substituição ao Calcário agrícola sobre a cultura de cana de açúcar. In: 58º Congresso Anual da ABM, 2003, Rio de Janeiro. **Anais do 58º Congresso Anual da ABM**. São Paulo : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003. p.1398-1406.

- LIMA, M. S. M.; SOUZA, C. M.; CASTRO, L. F. A.; JACOMINO, V. M. F.; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; ROSADO, V. B.. Avaliação das características agronômicas do pó-de-balão gerado no sistema de limpeza de gás do alto-forno a carvão vegetal. In: XXXIII Seminário de Redução de minério de Ferro e Matérias-Primas, 2003, Ouro Preto. **Anais do XXXIII Seminário de Redução de minério de Ferro e Matérias-Primas**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003. p.60-69.
- CASTRO, L. F. A.; ROCHA, S. H. F. S.; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; JACOMINO, V. M. F.; LOPES, L. E. F.. Aproveitamento de resíduos gerados na limpeza dos gases de alto-forno através da briquetagem. In: 57º Congresso Anual da ABM Internacional, 2002, São Paulo. **Anais do 57º Congresso Anual da ABM Internacional**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002. p.1239-1248.
- CASTRO, L. F. A.; CASTRO, B. A. C.; GOMES, A. M.; JACOMINO, V. M. F.; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite. Estudo das potencialidades de utilização da escória de alto-forno a carvão vegetal na pavimentação. In: 57º Congresso Anual da ABM Internacional, 2002, São Paulo. **Anais do 57º Congresso Anual da ABM Internacional**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002. p.1249-1258.
- CASTRO, L. F. A.; SOUZA, C. M.; SILVA, C. S. W ; JACOMINO, V. M. F.; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; LIMA, M. S. M.. Caracterização de escória da produção de Ferro-gusa a carvão vegetal para uso agrícola. In: 57º Congresso Anual da ABM Internacional, 2002, São Paulo. **Anais do 57º Congresso Anual da ABM Internacional**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002. p.1259-1267.
- JACOMINO, V. M. F.; BATISTA, A. A. M.; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; CASTRO, L. F. A.. Estudo técnico e econômico para avaliação de projetos de controle da poluição atmosférica. In: 56º Congresso Anual da ABM Internacional, 2001, Belo Horizonte. **Anais do 56º Congresso Anual da ABM Internacional**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001. p.1536-1546.
- CASTRO, L. F. A.; TAVARES, R. P.; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; JACOMINO, V. M. F.; LOPES, L. E. F.. Operação adequada de um alto-forno a carvão vegetal visando uma menor geração de carga poluidora. In: 56º Congresso Anual da ABM Internacional, 2001, Belo Horizonte. **Anais do 56º Congresso Anual da ABM Internacional**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001. p.1324-1332.

- RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; JACOMINO, V. M. F.; CASTRO, L. F. A.; BATISTA, A. A. M.. Efluentes atmosféricos: o estado da arte do ponto de vista do controle ambiental nas unidades independentes de produção de Ferro-gusa de Minas Gerais. In: 55º Congresso Anual da ABM, 2000, Rio de Janeiro. **Anais 55º Congresso Anual da ABM**. São Paulo: ABM, 2000. p.676-686.
- JACOMINO, V. M. F.; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; CASTRO, L. F. A.; BATISTA, A. A. M.. Uso de escória de alto-forno: alternativas para melhoria da qualidade ambiental. In: XXXI Seminário de Redução de minério de Ferro da ABM, 2000, SANTOS. **Anais XXXI Seminário de Redução de minério de Ferro da ABM**. São Paul : ABM, 2000. p.97-108.
- RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; CASTRO, L. F. A.; JACOMINO, V. M. F.; BATISTA, A. A. M.; VASCONCELOS, W.; FIGUEIREDO, D.. Controle ambiental de efluentes atmosféricos e líquidos gerados pela unidades independentes de produção de Ferro-gusa de Minas Gerais. In: XXX Seminário de Redução de minério de Ferro da ABM, 1999, Belo Horizonte. **Anais XXX Seminário de Redução de minério de Ferro da ABM**. São Paulo: ABM, 1999. p.385-395.
- JACOMINO, V. M. F.; PEGO, V.; BATISTA, A. A. M.; RIBEIRO, Eduardo Delano Leite; CASTRO, L. F. A.; LOPES, L. E. F.; BATISTA, W.. Diagnóstico do gerenciamento de resíduos sólidos gerados em unidades independentes de produção de Ferro-gusa de Minas Gerais. In: XXX Seminário de Redução de minério de Ferro da ABM, 1999, Belo Horizonte. **Anais XXX Seminário de Redução de minério de Ferro da ABM**. São Paulo: ABM, 1999. p 233-243.