

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

**WENER MIRANDA TEIXEIRA DOS SANTOS**



**Avaliação do uso de finos de carvão ( co-produto) da refinaria de alumina para redução do minério de ferro no setor siderúrgico.**

**SUPRA OMNIS LUX LUCIS**



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Engenharia Química  
Programa de Pós-Graduação



**Avaliação do uso de finos de carvão (co-produto) da  
refinaria de alumina para redução do minério de ferro  
no setor siderúrgico.**

**Orientador:** Prof. Dr Gilmar Trindade de Araújo

**Mestrando:** Wener Miranda Teixeira dos Santos

---

CAMPINA GRANDE – PB  
2007

**Avaliação do uso de finos de carvão (co-produto) da refinaria  
de alumina para redução do minério de ferro no setor  
siderúrgico.**

**WENER MIRANDATEIXEIRA DOS SANTOS**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA  
GRANDE COMO PARTE DOS  
REQUISITOS EXIGIDOS PARA  
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
ENGENHARIA QUÍMICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: OPERAÇÕES E PROCESSOS

ORIENTADOR: PROF. DR. GILMAR TRINDADE DE ARAÚJO

**CAMPINA GRANDE – PB**  
2007



Santos, Wener Miranda Teixeira dos

Avaliação do uso de finos de carvão (co-produto) da refinaria de alumina para redução do minério de ferro no setor siderúrgico. Wener Miranda Teixeira dos Santos. São Luís, 2007.

85f.: il.

Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal Campina Grande - UFCC, 2007.

1 Carvão vegetal. 2. Finos de carvão.  
I. Título.

CDU 662.711 (043)

**Avaliação do uso de finos de carvão (co-produto) da refinaria  
de alumina para redução do minério de ferro no setor  
siderúrgico.**

**WENER MIRANDA TEIXEIRA DOS SANTOS**

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 27 / abril / 2007

BANCA EXAMINADORA:

  
PROF. DR. GILMAR TRINDADE DE ARAÚJO (UFCG)  
ORIENTADOR

  
PROFa. DRa. ANA PAULA TRINDADE ROCHA (UEPB)  
EXAMINADOR EXTERNA

  
PROF. DR. RENATO ALEXANDRE C. DE SANTANA (UFCG)  
EXAMINADOR INTERNO

A minha família, Danúbia, esposa dedicada e companheira e aos meus filhos queridos Danilo M. Teixeira dos Santos, Diogo M. Teixeira dos Santos e Dimas M. Teixeira dos Santos.

Aos meus pais, Raimundo e Cecilde, que em todos os momentos sempre me incentivam e apoiaram, aos meus irmãos, Wellington e Marcília, cunhada Ariadne e ao cunhado Luciano, aos meus sobrinhos Maria Cecília, Maria Eduarda, Wellington Filho e João Ricardo. Aos meus tios-irmãos, Nelson Teixeira e Cenidalva Teixeira, sendo estes grandes colaboradores para o sucesso deste estudo.

Aos meus avós paternos e maternos, principalmente ao patriarca Hamilton Teixeira (1920-2007), homem que em todas as situações sempre incentivou relatando "*o crescimento do homem está relacionado aos estudos*".

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os professores do programa, especialmente, aos professores Gilmar Trindade de Araújo e Romildo Pereira Brito, pela orientação, incentivo e motivação para realização deste trabalho e a Universidade Federal de Campina Grande, UFCG.

Ao Domingos Campos e Elesbão Sousa (Sousinha), que apoiaram desde o início este projetos. A equipe do laboratório da ALUMAR, principalmente, à Silene Vendrasco, Eduardo Frota e Cássio pelas análises realizadas o laboratório, e ao recursos humanos da ALUMAR nas pessoas de Graça Abreu e Heloisa. A empresa COSIMA, enviando amostra de materiais do seu processo, na pessoa Ângela Rocha.

Ao meu amigo Gustavo Cursino, que muito contribuiu para o desenvolvimento desta pesquisa e toda turma que participou e concluíram este programa.

À ALUMAR, por todo o programa, pela oportunidade e pelo apoio financeiro.

A FAPEMA, na pessoa do Prof Dr. Sofiane Labidi, que incentiva a pesquisa no Estado do Maranhão e acredita no desenvolvimento e capacitação educacional do povo maranhense.

A todos que de alguma forma me apoiaram e acreditaram que poderiam me ajudar.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicação dos finos de carvão, gerados pelas caldeiras da Refinaria da ALUMAR, para o setor siderúrgico.

Os finos de carvão, originados do carvão mineral, foram submetidos as análises físico-químicos, visando atender a potencialidade do setor siderúrgico nos Estados do Maranhão e Pará , em substituição total ou parcial do carvão vegetal, cuja produção, crescendo de forma desordenada, vem agravando o meio-ambiente devido às muitas carvoarias obterem a madeira de forma predatória, tratando-se de uma situação ilegal, insustentável em termos ambientais, e danosa economicamente, a curto e médio prazo.

Palavras-chave: carvão vegetal, siderúrgicas, finos de carvão, meio-ambiente.



## ABSTRACT

This work has as objective to evaluate the application of the fine ones of coal, originated for the boilers of the Refinery of the ALUMAR, for the siderurgical sector.

The fine ones of coal, originated of the mineral coal, had been submitted analyze physicist-chemistries, aiming at to take care of the potentiality to them of the siderurgical sector in the States of the Maranhão and Pará, in total or partial substitution of the vegetal coal, whose production growing of disordered form, comes aggravating the half-environment due the many coal bunkers to get the wood of predatory form, being about an illegal, unsustainable in ambient terms and harmful situation economically the short and average stated period.

Word-key: vegetal coal, siderurgical, fine of coal, half-environment.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE EQUAÇÕES	12
LISTA DE GRÁFICOS	13
LISTA DE SIGLAS	14
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>OBJETIVO E METAS</b>	
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>18</b>
2.1 Processo Bayer	20
2.2 Matérias-primas da Refinaria ALUMAR	23
2.3 Descrição do processo de obtenção do ferro-gusa	28
2.4 Operação do alto-forno	33
2.5 Potencial siderúrgico nos Estados do Maranhão e Pará	36
2.6 Especificação do ferro-gusa e insumos	38
2.7 Carvão vegetal	41
2.8 Finos de carvão	50
<b>3 Obtenção dos finos de carvão</b>	<b>52</b>
<b>4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO</b>	<b>56</b>
4.1 Preparação das composições	56
4.2 Análises realizadas	59
4.2.1 Teor de carbono	60
4.2.2 Teor de enxofre	61
4.2.3 Poder calorífico	62
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>65</b>
5.1 Classificação dos Finos de Carvão (Co-produto)	65
5.2 Determinação da composição química e calores de energia das misturas.	67
5.3 Realização das reduções de ferro	76
<b>6 CONCLUSÃO</b>	<b>80</b>
<b>7 TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>82</b>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Faixa granulométrica da Bauxita -----	23
Tabela 2	Composição química média da Bauxita consumida pela ALUMAR ---	23
Tabela 3	Características de algumas reservas de carvão bruto no Brasil -----	25
Tabela 4	Características de algumas reservas de carvão bruto no mundo -----	26
Tabela 5	Carga típica para a produção de gusa -----	31
Tabela 6	Elementos e percentuais encontrados no ferro-gusa -----	38
Tabela 7	Especificação do carvão vegetal -----	49
Tabela 8	Composição 1: carvão vegetal e finos do ciclone. -----	56
Tabela 9	Composição 2: carvão vegetal e finos do silo14. -----	56
Tabela 10	Composição 3: carvão vegetal e finos do ciclone e silo14. -----	57
Tabela 11	Especificação dos elementos químicos da empresa COSIMA. -----	60
Tabela 12	Análise de classificação do resíduo dos finos de carvão do ciclone ---	65
Tabela 13	Análise de classificação do resíduo dos finos do silo 14 -----	66
Tabela 14	Análise química do carvão mineral vindo da Austrália e Colômbia ----	67
Tabela 15	Composição elementar do Ciclone e Silo 14 -----	68
Tabela 16	Resultado da composição 1: carvão vegetal x finos de carvão-ciclone. -----	69
Tabela 17	Resultado da composição 2: carvão vegetal x finos de carvão-silo 14. -----	69
Tabela 18	Resultado da composição 3: carvão vegetal x finos de carvão-ciclone e silo 14. -----	70
Tabela 19	Resultados obtidos da redução com minério de ferro e insumos. -----	77

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquemática do processo de produção do Alumínio -----	19
Figura 2	Diagrama de blocos do fluxo de processo - Refinaria ALUMAR -----	22
Figura 3	Seção transversal de uma instalação de alto-forno, incluindo o equipamento auxiliar principal. -----	28
Figura 4	Seção transversal de um alto-forno moderno -----	30
Figura 5	Fluxo do processo produtivo siderúrgico -----	32
Figura 6	Localização das indústrias siderúrgicas na Amazônia Oriental brasileira. -----	37
Figura 7	Dimensional dos lingotes do ferro-gusa -----	39
Figura 8	Minério de ferro -----	40
Figura 9	Calcário dolomítico -----	40
Figura 10	Carvão vegetal -----	40
Figura 11	Produção nacional de carvão vegetal de florestas plantadas e de florestas nativas. -----	41
Figura 12	Consumo total de carvão vegetal de florestas plantadas e de florestas nativas. -----	42
Figura 13	Foto com visão parcial de baterias de fornos onde se carboniza lenha originária de desmatamento -----	47
Figura 14	Pontos de acumulo dos finos de carvão nas caldeiras da ALUMAR -----	53
Figura 15	Ponto de retirada dos finos de carvão do silo 14 -----	54
Figura 16	Ponto de retirada dos finos de carvão do ciclone -----	54
Figura 17	Pátio de estocagem dos finos de carvão nas caldeiras da ALUMAR. -----	55
Figura 18	Movimentação dos finos de carvão no pátio de estocagem -----	55
Figura 19	Preparação das amostras -----	57
Figura 20	Pesagem das amostras -----	57
Figura 21	Equipamento LECO SC 132 -----	61
Figura 22	Calorímetro Parr 1261 -----	63
Figura 23	Preparação das amostras na Mufla -----	77
Figura 24	Cadinhos na Mufla -----	78
Figura 25	Operação nas muflas – Laboratório ALUMAR -----	78
Figura 26	Desgaste físico dos cadinhos de grafite -----	78

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Reação de Digestão -----	20
Equação 2	Reação de Precipitação -----	21
Equação 3	Reação de Calcinação -----	21
Equação 4	Reação origina grande quantidade de calor -----	33
Equação 5	Reações químicas de redução do minério de ferro (1) -----	33
Equação 6	Reações químicas de redução do minério de ferro (2) -----	33
Equação 7	Reações químicas de redução do minério de ferro (3) -----	33
Equação 8	Redução do manganês (1) -----	34
Equação 9	Redução do manganês (2) -----	34
Equação 10	Redução do silício. -----	34
Equação 11	Redução do fósforo. -----	34
Equação 12	Reação de decomposição dos carbonatos (1) -----	34
Equação 13	Reação de decomposição dos carbonatos (2) -----	34

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Geração dos finos de carvão -----	52
Gráfico 2	Poder calorífico - carvão vegetal x finos de carvão do ciclone. -----	70
Gráfico 3	Teor de enxofre - carvão vegetal x finos de carvão do ciclone. -----	71
Gráfico 4	Teor de carbono - carvão vegetal x finos de carvão do ciclone. -----	71
Gráfico 5	Poder calorífico - carvão vegetal x finos de carvão do silo 14. -----	72
Gráfico 6	Teor de enxofre - carvão vegetal x finos de carvão do silo 14. -----	73
Gráfico 7	Teor de carbono - carvão vegetal x finos de carvão do silo 14. -----	73
Gráfico 8	Poder calorífico - carvão vegetal x finos de carvão do ciclone e do silo 14. -	74
Gráfico 9	Teor de enxofre - carvão vegetal x finos de carvão do ciclone e do silo 14. -----	74
Gráfico 10	Teor de carbono - carvão vegetal x finos de carvão do ciclone e do silo 14. -----	75

## LISTA DE SIGLAS

$Al_2O_3$	Alumina
AMS	Associação Mineira de Silvicultura
ASICA	Associação das Siderúrgicas de Carajás
BPF	Baixo ponto de fusão
C	Carbono
CaO	Oxido de Cálcio
Ci	Finos de carvão do ciclone
CO	Monóxido de carbono
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Cv	Carvão vegetal
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
$H_2O$	Água
$H_2SO_4$	Ácido sulfúrico
IBGE	Instituto
L.O.I.	Loss On Ignition
mdc	Metros de carvão
MG	Minas Gerais
MgO	Oxido de magnésio
Mn	Manganês
MnO	Oxido de manganês
Mo	Moblidenio
NaOH	Oxido de sódio
NBR	Normas Brasileiras Regulatórias
Ni	Níquel
P	Fósforo
S14	Finos de carvão do silo 14
S	Enxofre
Si	Silício
$SiO_2$	Sílica

Sn	Estanho
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre
SO <sub>3</sub>	Trióxido de enxofre
Ti	Titânio
ton	Tonelada
V	Vanádio
Zn	Zinco
% MV	Porcentagem de material volátil



## 1. INTRODUÇÃO

O alumínio, metal não ferroso extraído da bauxita, minério encontrado em grande quantidade em todo o mundo. Conforme a Associação Brasileira do Alumínio, é o metal mais importante dessa classe, cujo desenvolvimento de produtos com custo competitivo e grande variedade de utilização, resulta no êxito da aplicação de suas principais propriedades: o baixo peso específico, a boa resistência à corrosão e a alta condutibilidade térmica e elétrica.

Na refinaria da ALUMAR, onde ocorre o processo de extração da alumina da bauxita, através de um processo hidrometalúrgico – Processo Bayer, a bauxita é misturada com uma solução de soda cáustica, moída, transformando-se em pasta, que é aquecida em vasos de alta pressão, para haver a dissolução da Alumina na solução. Em seguida, a solução rica em alumina segue para o precipitador na forma de alumina tri-hidratada, que é calcinada a alta temperatura, para a obtenção da alumina.

Neste processo de refino é utilizado vapor produzido em caldeiras. A ALUMAR possui cinco caldeiras: três que usam como combustível o carvão mineral e possuem uma capacidade de geração de vapor de 70 t/h por caldeira, e duas à óleo BPF, que juntas possuem a capacidade de produzirem 70t/h de vapor. O uso do carvão mineral gera os finos de carvão, que terão como destino o aterro e as lagoas de estabilização, que além de poluírem o meio ambiente, necessitam de manejos para futuras recuperações e minimizações de possíveis impactos ambientais que poderão vir ser causados. O carvão mineral utilizado no processo da Refinaria é oriundo da Austrália e da Colômbia.

## OBJETIVO E METAS

O objetivo desse estudo é avaliar o uso dos finos de carvão (co-produto) com suas blendagens, como elemento redutor e combustível em processos siderúrgicos na produção de ferro, em substituição total ou parcial ao carvão vegetal.

A meta do presente trabalho é tentar reduzir o uso excessivo de carvão vegetal utilizado por este setor, contribuindo assim para uma redução do desmatamento da floresta amazônica e tentar dar um fim industrial para os finos de carvão produzidos no processo de obtenção de alumina, reduzindo assim o impacto ambiental, causado pelo depósito destes finos no meio ambiente.

Para alcançar este objetivo serão executadas as seguintes atividades:

- Classificar a classe de resíduos que os finos de carvão pertencem;
- Caracterização química dos finos de carvão e do carvão vegetal;
- Quantificação dos teores de carbono, enxofre e poder calorífico dos finos de carvão;
- Avaliação, em escala laboratorial, dos percentuais de mistura dos finos de carvão, que atenderão às necessidades de redução do minério de ferro no seguimento siderúrgico.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Hoje, os Estados Unidos e o Canadá são os maiores produtores mundiais de alumínio, entretanto, nenhum deles possui jazidas de bauxita em seu território, dependendo exclusivamente da importação. O Brasil tem a terceira maior reserva do minério no mundo, localizada na região amazônica, perdendo apenas para Austrália e Guiné. Além da Amazônia, o alumínio pode ser encontrado no sudeste do Brasil, na região de Poços de Caldas e Cataguases, no estado de Minas Gerais. A bauxita é o minério mais importante para a produção de alumínio, contendo de 35% a 55% de óxido de alumínio (ABAL, 2006).

A alumina, produzida pela ALUMAR é comercializada ou enviada a unidade de redução, onde é transformada em alumínio, através de um processo que consiste na dissolução eletrolítica da alumina, em banho eletrolítico fundido, por onde passa uma corrente elétrica contínua. O alumínio produzido é extraído, por sucção, através de cadinhos e transportado para o lingotamento, onde são produzidos os lingotes de alumínio, de acordo com a solicitação do cliente externo.

O alumínio primário, ou de primeira fusão, apresenta designação do metal com 99,50% como grau de pureza comercial, embora este possa chegar a 99,999%, que é classificado como alumínio ultra puro (Hatch 1990). A figura 1 mostra o fluxo do processo de forma resumida.

As pesquisas de reciclagem de resíduos de carvão mineral, vêm se ampliando no Brasil, que se limitam a aspectos do desenvolvimento técnico do material, tendo poucas referências neste estudo, principalmente tratando-se de carvão mineral importado. Há alguns estudos referentes à aplicação das cinzas de carvão mineral da bacia carbonífera de tubarão, localizado em Santa Catarina, para obtenção de vidros e fabricação de zeólitas para descontaminação de águas piritosa de minas. Entretanto, a ênfase em viabilidade do mercado dos co-produtos é um compromisso com a eficácia da pesquisa, pois os benefícios sociais de um processo de pesquisa somente vão se realizar, na sua totalidade, se o novo produto produzido



## 2.1 Processo Bayer

O processo Bayer é um processo químico, conhecido como refino é a técnica praticada hoje para produção da alumina, patenteado em 1887 pelo austríaco Karl Joseph Bayer. A primeira etapa na produção do alumínio é a extração da alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) do minério de bauxita, sendo de grande importância neste processo um alto teor de alumina, e também uma porção mínima possível de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e outras impurezas.

A alumina é um pó branco seco e fino, de consistência similar a areia de praia. Mais de 90% da alumina produzida no mundo é utilizada para produção de alumínio, o restante é empregado como abrasivo, material refratário, na indústria química, cerâmica e indústria de vidros.

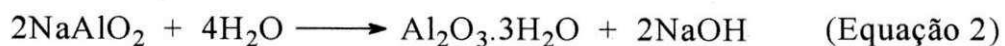
Para reagir com a alumina e separá-la de outros componentes do minério de bauxita, o Processo Bayer emprega uma solução de soda cáustica aquecida. A parte desejável do minério é extraída pelo tratamento com uma solução aquosa, sendo um processo hidrometalúrgico.

No processo Bayer, a bauxita moída, misturada com uma solução de soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ), reage, tornando possível a remoção da alumina da mistura, segundo (Equação 1):



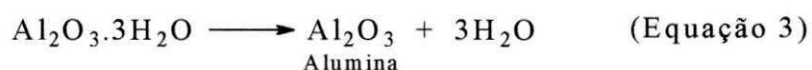
A alumina, presente na bauxita está sob a forma do tri-hidrato  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (gibsite), é conhecida como hidrato. A reação acima é realizada em grandes *digestores*, sendo a reação básica do processo Bayer.

Como a solubilidade do hidrato, em soda cáustica, aumenta com a temperatura, a reação pode ser facilmente reversível pelo resfriamento da solução, recuperando a alumina. Esta reação (Equação 4) ocorre nos *precipitadores*.



Além da reação se deslocar para o sentido da formação do hidrato, ela também serve para recuperar a soda cáustica no processo.

A última etapa do processo Bayer, consiste na eliminação da água de cristalização do hidrato (Equação 3). Para isso, o hidrato é aquecido a cerca de 1000°C, em *calcinaidores*. Essa fase é chamada de calcinação, e a reação envolvida é:



A alumina desidratada segue da Refinaria para a Unidade de Redução onde ocorrerá a obtenção do alumínio metálico, em *cubas eletrolíticas*. O diagrama de blocos do processo de obtenção da alumina na refinaria da empresa ALUMAR, encontra-se representado na Figura 2.

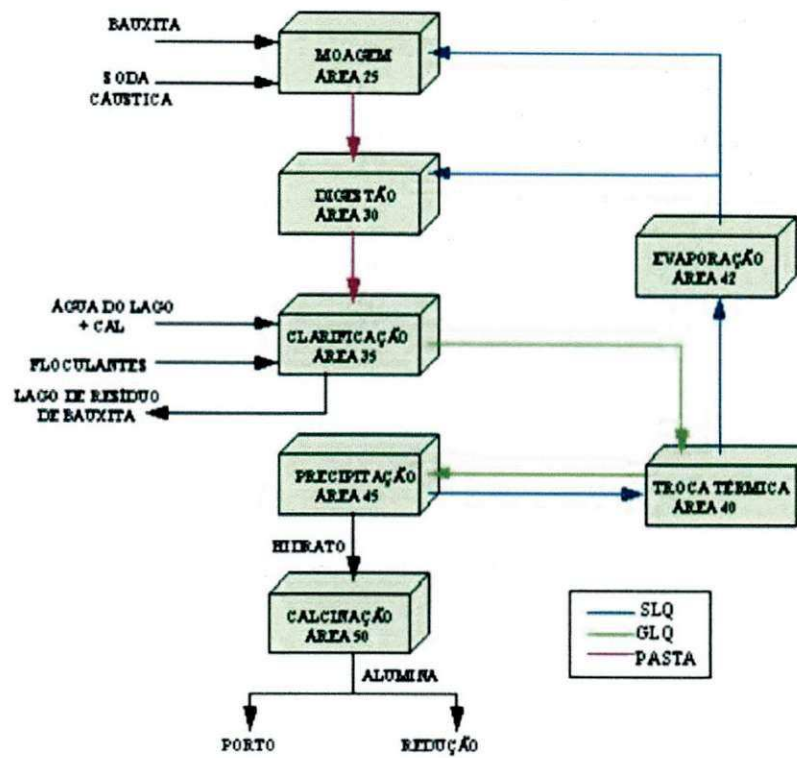


Figura 2 - Diagrama de blocos do fluxo de processo - Refinaria Alumina<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Fonte: Consórcio de Alumínio do Maranhão, 2006.

## 2.2 Matérias-primas da Refinaria ALUMAR

### - Bauxita

A bauxita utilizada pela ALUMAR vem da região de Trombetas, no Estado do Pará, através de navios (graneleiros). Ela possui 50% de alumina tri-hidratada ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) e a relação de consumo médio é de:

4 ton de Bauxita Seca  $\longrightarrow$  2 ton Alumina  $\longrightarrow$  1 ton Alumínio

O fornecedor de bauxita para a ALUMAR é a mineração Rio do Norte e as bauxitas produzidas são:

Tabela 1: Faixa granulométrica da bauxita<sup>3</sup>

Granulada	+ 14 mesh
Fina	- 14 + 150 mesh
Superfina	- 150 + 400 mesh

A bauxita consumida pela ALUMAR, de granulometria variada (Tabela 1) consiste de 60% granulada e de 40% fina.

A composição química média da bauxita está exposta na Tabela 2:

Tabela 2: Composição química média da bauxita consumida pela ALUMAR.<sup>4</sup>

• Umidade	12,6%	• $\text{SiO}_2$ total	4,2%
• $\text{Al}_2\text{O}_3$ disp.	50,6%	• $\text{SiO}_2$ reativa	2,5%
• $\text{Al}_2\text{O}_3$ total	53,7%	• $\text{Fe}_2\text{O}_3$	11,6%
• $\text{TiO}_2$	1,04%	• L.O.I.:	28,9%
• Carb. Org.	0,04%		
		(L.O.I. = Loss On Ignition)	

<sup>3 e 4</sup> Fonte: Mineração Rio do Norte, 2006.



A sílica reativa, constituída de caolinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), dissolve em soda formando silicatos de sódio. Estes, são instáveis e tendem a precipitar nas tubulações comprometendo a qualidade da alumina tri-hidratada, na precipitação.

*- Soda Cáustica (NaOH)*

A soda cáustica utilizada pela ALUMAR vem da Braskem, localizada em Maceió - AL, e da Dow Química, na Bahia. A soda, enviada por navio, consiste em uma solução de 50% NaOH em peso, de densidade em torno de 1,52 g/cm<sup>3</sup>. Ela é recebida no Porto da Alumar e estocada no retro-porto em um tanque de aço carbono, antes de ser enviada à Refinaria.

Além de ser responsável pela extração da alumina tri-hidratada da bauxita, a soda também é usada em lavagem cáustica de equipamentos e na dissolução de hidrato precipitado. O consumo médio de soda é de 65 kg/ton. de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

*- Cal (CaO)*

A cal, adquirida na região, é enviada à Alumar por caminhão, sendo tratada na Refinaria. O consumo médio da cal é de 10 kg/ton.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

*- Carvão mineral*

O carvão mineral utilizado pela companhia ALUMAR é oriunda da Austrália e da Colômbia, sendo este fornecido pela mineração Drumond. O poder calorífico em média de 30 GJ/ton, o consumo médio de carvão é de 135 kg/ton. É um combustível natural extraído da terra por mineração, de cor preta ou marrom, composto principalmente carbono e hidrocarbonetos sob a forma de betumes.

O carvão mineral é o mais abundante dos combustíveis fósseis, com reservas provadas da ordem de 1 trilhão de toneladas, o suficiente para atender à demanda atual por mais de duzentos anos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2003).

O carvão é uma complexa e variada mistura de componentes orgânicos sólidos, fossilizados ao longo de milhões de anos, como ocorre com todos os combustíveis fósseis. Sua qualidade, determinada pelo conteúdo de carbono, varia de acordo com o tipo e o estágio dos componentes orgânicos. A turfa, de baixo

conteúdo carbonífero, constitui um dos primeiros estágios do carvão, com teor de carbono na ordem de 45%; o linhito apresenta um índice que varia de 60% a 75%; o carvão betuminoso (hulha), mais utilizado como combustível, contém cerca de 75% a 85% de carbono, e o mais puro dos carvões; o antracito, apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90% (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2003).

Da mesma forma, os depósitos variam de camadas relativamente simples e próximas da superfície do solo e, portanto, de fácil extração e baixo custo, a complexas e profundas camadas, de difícil extração e custos elevados.

No Brasil, as principais reservas de carvão mineral estão situadas nos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e São Paulo, em ordem decrescente, São Paulo é a menor. Em milhões de toneladas temos o Rio Grande do Sul com 20.859, Santa Catarina com 1.941, Paraná com 179 e São Paulo 10 (DNPM, 2002). As características de algumas reservas de carvão bruto no Brasil, na Tabela 3:

Tabela 3: Características de algumas reservas de carvão bruto no Brasil<sup>5</sup>

Brasil	PCS kcal/kg	Carbono %	Cinzas %	Enxofre %
Paraná	4850	30	44	7
Sta. Catarina	2750	21 - 26	58 - 62	4,3 - 4,7
Candiota	3200	23	52	1,6
Outros RS	3000 - 4500	23 - 30	40 - 55	0,5 - 2,5

As maiores reservas mundiais de carvão mineral, na ordem de 90% , estão concentradas na Ásia e Oceania, Eurásia e América do Norte (DNPM,2002).

O preço do carvão mineral depende muito do poder calorífico e do teor de enxofre, e há várias diferenças entre suas propriedades, conforme a Tabela 4.

<sup>5</sup> Fonte: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2002.

Tabela 4: Características de algumas reservas de carvão bruto no mundo.<sup>6</sup>

Mundo	Austrália	África do Sul	Colômbia	EUA (Ohio)
Poder Calorífico (kcal/kg)	5.370	6.760	7.000–8.000	6.378-7.728
Umidade (%)	6,9	4,3	2,0-7,0	nd
Voláteis (%)	24,8	35,3	34,0 - 39,0	38,1
Carbono (%)	44,3	50,3	65,0	64,2 - 77,4
Cinzas (%)	24	10,1	1,0 - 6,0	7,5 - 19,8
Enxofre (%)	0,35	0,7	0,35 - 1,0	1,0 - 2,5

O carvão mineral que a empresa ALUMAR utiliza na refinaria é importado dos países de Austrália e da Colômbia, onde este tem 66 % de carbono fixo.

*- Floculante sintético*

É utilizado como auxiliar de decantação da lama nos espessadores e lavadores. O consumo médio é de 0,21 kg/ton. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

*- Óleo diesel e BPF*

O óleo diesel e o BPF são utilizados nos fornos dos calcinadores. O óleo diesel é usado para aquecimento do calcinador e o BPF para calcinar a alumina.

Os consumos médios são de 77 kg de BPF e 1 kg de diesel, por ton. de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

*- Eletricidade*

O consumo médio de energia elétrica é de 260 Kwh/ton. de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> , e é fornecida pela Eietronorte.

<sup>6</sup> Fonte: World Coal Institute – WCI, 2003.

- *Ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)*

Usado para lavagem ácida de trocadores, para remover as incrustações nos tubos, e também para neutralização de efluentes alcalinos. O consumo médio é de 1,5 kg/ton. de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

- *Gás carbônico (CO<sub>2</sub>)*

Usado na neutralização de efluentes alcalinos.



descende por todo o alto-forno como um material sólido, e praticamente sem sofrer alteração, exceto a perda de umidade, devendo para tal ter propriedades, como porosidade e resistência necessárias, para que deixe ascender as correntes de gases redutores e permitam o fluxo descendente de gusa e escória fundidas, além de resistir a carga de toda a coluna de material do alto-forno (CHIAVERINI,1994).

O minério de ferro, constituído em sua maior parte por óxidos de ferro além de impurezas como sílica e alumina, num fluxo descendente no alto-forno encontra a corrente ascendente de monóxido de carbono e numa reação em fase sólida, a temperatura inferior a 1000°C transforma-se em FeO (óxido de ferro II) formando dióxido de carbono. Essa reação, também chamada de redução indireta, ocorre na parte superior e intermediária do alto forno, denominada chaminé.

Na parte mais larga ou rampa do alto-forno, que tem uma geometria semelhante a um sino, numa região denominada zona coesiva, ocorre a fusão do óxido de ferro e da escória (impurezas do minério mais fundentes), e a sua reação com o carbono do carvão vegetal a uma temperatura superior a 1200°C, denominada redução direta, formando monóxido de carbono que adiciona-se a corrente ascendente vinda do fundo do alto-forno. O gusa e a escória escoam para a camada inferior, e descem para o coração do alto forno, onde ambos os materiais são retirados em batelada e separados na linha de corrida fora do alto-forno, conforme Figura 4, (CHIAVERINI,1994).

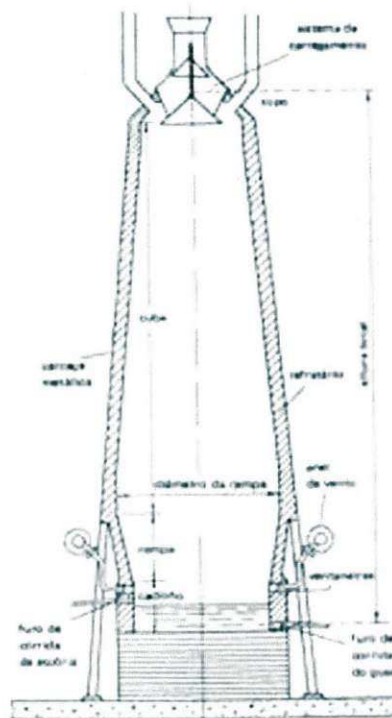


Figura 4: Seção transversal de um alto-forno moderno.<sup>8</sup>

O fundente (calcário dolomítico) adicionado à carga do alto-forno tem a função de proporcionar a formação de uma escória fundida numa estreita faixa de temperatura, de fácil escoamento na temperatura de fusão do gusa e que fique sobrenadando a este. A escória é um composto ternário formado por sílica, alumina e óxido de cálcio cuja função principal é remover os componentes não voláteis da carga do alto-forno. A seleção e proporção de material fundente são estabelecidas em função da composição do minério utilizado, e das cinzas presentes no carvão vegetal.

Na composição da escória também deve ser avaliado o grau de corrosividade desta, aos refratários do alto-forno, escória com elevada alcalinidade. A escória, após ser separada do gusa é resfriada e pulverizada, sendo aproveitada pelas indústrias cimenteiras.

O gusa é produzido nesta etapa, é descarregado em carros torpedo, vagões tanque com este formato, que transfere-no para a etapa de conversão em aço carbono na aciaria, ou, quando necessário, para a comercialização deste como

<sup>8</sup> Fonte: Tecnologia mecânica, 1986.

produto final, conforme o fluxo do processo produtivo siderúrgico demonstrado na Figura 5.

Para cada tonelada de gusa contendo aproximadamente 3,8-4,5% de carbono e aproximadamente 270 kg de escória é necessário a seguinte carga (carga típica para a produção de 1.000 kg de gusa contendo 3,8 - 4,5% de C), conforme Tabela 5:

Tabela 5: Carga típica para a produção de 1 ton de ferro gusa<sup>9</sup>.

Minério de ferro sinterizado c/ 65% Fe	kg	914	26,60%
Escória de aciaria	kg	26	0,76%
Carvão vegetal	kg	600	17,46%
Fundente	kg	330	9,60%
Umidade total na carga	kg	66	1,92%
Ar	kg	1500	43,66%
total		3436	100%

<sup>9</sup> Fonte: COSIMA-Siderúrgica do Maranhão, 2006.



O fluxo do processo produtivo siderúrgico, para obtenção do ferro-gusa, está demonstrado na figura 5.

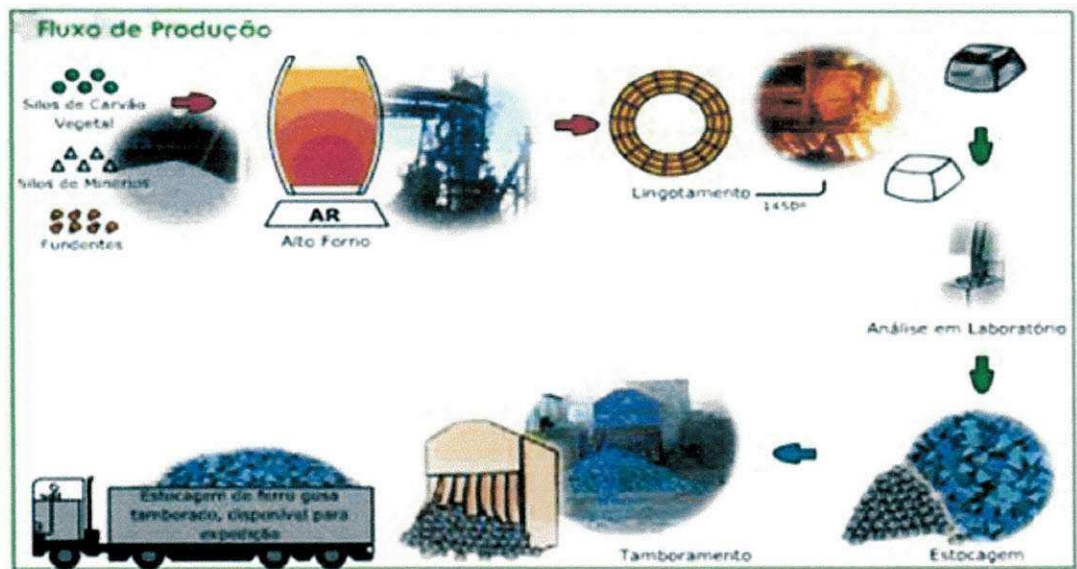


Figura 5: Fluxo do processo siderúrgico para produção de ferro gusa.<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Fonte: Belgo mineira, 2005.

## 2.4 Operação do alto-forno

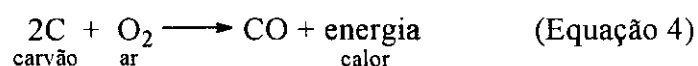
Num alto-forno, existem duas correntes de materiais responsáveis pelas reações que se verificam, isto é, uma corrente sólida, representada pela carga que desce paulatinamente e uma corrente gasosa que se origina pela reação do carbono do carvão com o oxigênio do ar soprado pelas ventaneiras, que sobe em contracorrente.

### Reações químicas no alto-forno

#### 1) Produção de energia e formação de monóxido de carbono (CO)

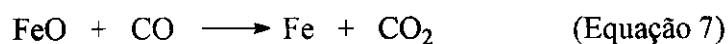
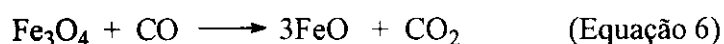
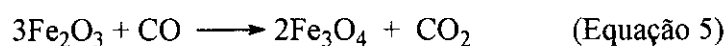
A queima de carvão ativado pela entrada de ar quente, fornece calor e monóxido de carbono, este último, importante na redução do minério.

A oxidação do carbono ocorre próximo a entrada de ar (ventaneiras), próximo a base do alto forno, cerca de 1 a 3 metros. Na reação não produz o CO<sub>2</sub> devido a altas temperaturas (1500 °C) e excesso de carbono (Equação 4). A produção excessiva de CO torna o gás do alto forno combustível.



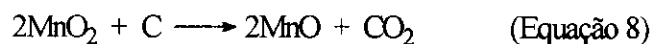
#### 2) Redução do ferro

O ferro do minério deve ser reduzido a ferro metálico. O monóxido de carbono serve para reduzir o ferro (Equações 5,6 e 7).

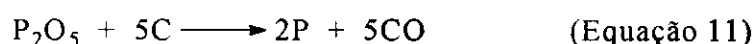
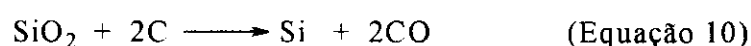
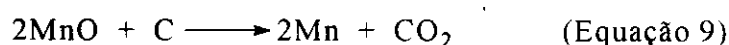


### 3) Redução do silício (Si), fósforo (P) e manganês (Mn)

Nas temperaturas mais baixas da parte superior do alto forno, ocorre a seguinte reação (Equação 8):

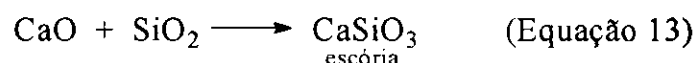


Nas altas temperaturas (Equações 9, 10 e 11):



Esta última reação (Equação 11) é incompatível em alto-forno, todo o fósforo do minério é incorporado no ferro gusa.

### 4) Reações da escória (Equações 12 e 13).



O silicato de cálcio recebe o nome de escória e deposita-se no cadinho sobre o ferro, evita a oxidação, se retirada periodicamente. As escórias são utilizadas na produção de tijolos, blocos e concretos. O gás do alto-forno limpo de pó, se usa como combustível nos recuperadores e nas caldeiras a vapor. Seu poder calorífico é aproximadamente de  $1000 \text{ cal/m}^3$  (CHIAVERINI,1986).

Todas estas reações produzem, então, o ferro gusa, que além de ferro e carbono também incorpora os elementos manganês (Mn), silício (Si), fósforo (P) e enxofre (S).

A formação da escória compreende reações bem mais complexas. Essa escória resulta da combinação do CaO e do MgO do calcário (fundente) com a ganga (impurezas) do minério e as cinzas do carvão. A escória caracteriza-se por sua grande fluidez e seu baixo peso específico. Assim, no cadinho (reservatório), a

escória e o gusa líquido separam-se por gravidade, formando duas camadas, isto é, a inferior (metálica) e a superior (escória), facilitando o vazamento de ambos os produtos (CHIAVERINI,1994).

## **2.5 Potencial siderúrgico nos Estados do Maranhão e Pará**

Pelo levantamento da Associação das Siderúrgicas de Carajás, ASICA, a produção atual de ferro gusa é de 3.500.000 toneladas, empregando 34.000 profissionais. O valor nas exportações no ano de 2004 atingiu U\$ 800.000.000,00 (Oitocentos milhões de dólares).

O parque industrial da Associação das Siderúrgicas de Carajás, ASICA está distribuída nos estados do Pará no município de Marabá com seis (6) usinas e quatorze (14) alto-fornos e no Maranhão nos municípios de Açailândia com cinco (5) usinas e treze (13) alto-fornos, Santa Inês com uma usina e dois (2) alto-fornos e em Bacabeira com uma usina e dois (2) alto-fornos.

Este pólo siderúrgico pode ser demonstrado na figura 6, onde há indicação da localização das indústrias siderúrgicas na Amazônia Oriental brasileira (MONTEIRO, 2002).

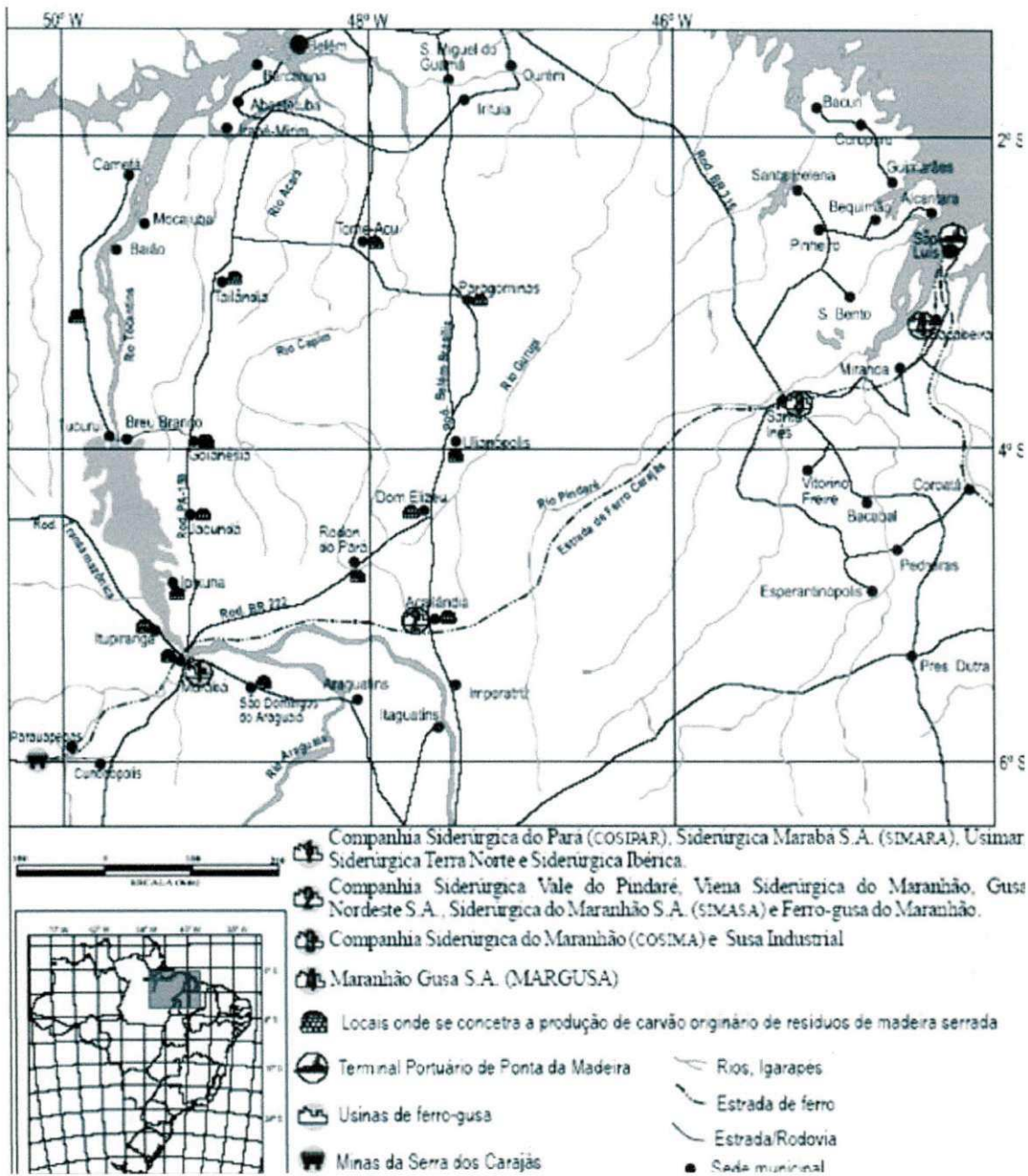


Figura 6: Localização das indústrias siderúrgicas na Amazônia Oriental brasileira. <sup>11</sup>

<sup>11</sup> Fonte: Monteiro, 2002.

## 2.6 Especificação do ferro-gusa e insumos

O ferro-gusa adquirido no Brasil varia entre 94 a 96% de ferro. As características química e física do ferro-gusa de aciaria fazem deste produto a melhor fonte de ferro virgem para outras unidades fabris deste segmento. Na Tabela 6 segue os elementos e percentuais encontrados no ferro-gusa:

Tabela 6: Elementos e percentuais encontrados no ferro-gusa<sup>12</sup>.

Análise Química		Outros Elementos			
Elementos	Básico Típico (%)	Ti	0.015	Cr	0.004
Si	0.5	V	0.004	Cu	0.007
P	0.07	Ni	0.004	Mo	<0.005
Mn	0.30	Sn	0.002	Zn	0.003
C	4.0	Al	0.031	Pb	0.002
S	0.03				

O formato do tamanho e o peso do lingote do ferro gusa de aciaria tem uma média de 5 quilos. Isto torna seu manuseio fácil e, ao mesmo tempo, reduz os custos de estocagem, descarga e transporte evitando degradação e geração de finos (ASICA, 2004).

Cada lingote, Figura 7, apresenta alta densidade, cerca de 3.5 toneladas métricas por metro cúbico ajuda no adensamento da sucata, e sua já citada pureza: sendo alto, com teor de Fe (de 94 a 96%) sem canga ou impurezas, combinado com teores de enxofre e fósforo muito baixos, são as características do ferro gusas produzidas com carvão vegetal. A ausência de contaminantes como Cu, Cr, Ni, Mo, Sn, V, Ti, e Zn, diluídos neste resíduo, abaixa os custos de misturas de sucata (ASICA, 2004).

<sup>12</sup> Fonte: Associação das Siderúrgicas de Carajás, ASICA.

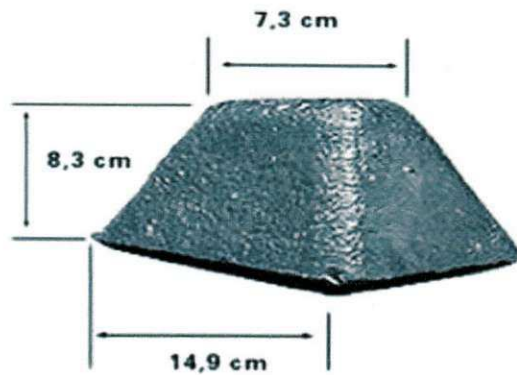


Figura 7: Dimensional dos lingotes do ferro-gusa.<sup>13</sup>

A especificação do minério de ferro, figura 8, contém sílica ( $\text{SiO}_2$ ), 1,10% , alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 1,32%, ferro(Fe), 65,69% , óxido de manganês ( $\text{MnO}$ ) , 0,39% e fósforo (P), 0,04%. O calcário dolomítico, figura 9, terá sílica ( $\text{SiO}_2$ ), 0,80%, alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 0,31%, óxido de cálcio (Cão), 32,32% , óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), 20,5% e óxido de manganês ( $\text{MnO}$ ), 0,05%. Já o carvão vegetal, figura 10, utilizados para obtenção do ferro-gusa nas siderúrgicas nos Estados do Maranhão e Pará são as seguintes: umidade , 8,10 % , cinzas, 7,25%, material volátil, 20,25% , carbono fixo (C), 60 % , e densidade, 286,72  $\text{kg/m}^3$ .

<sup>13</sup> Fonte: Associação das Siderúrgicas de Carajás, ASICA.





Figura 8: Minério de ferro utilizado na obtenção de ferro gusa.<sup>14</sup>



Figura 9: Calcário dolomítico usado na produção do ferro gusa.<sup>15</sup>



Figura 10: Carvão vegetal utilizado na obtenção de ferro gusa.<sup>16</sup>

<sup>14, 15 e 16</sup> Fonte: Companhia Siderúrgica do Maranhão - COSIMA, 2006.

## 2.7 Carvão vegetal

A produção de carvão vegetal, no Brasil, é destinada ao atendimento da demanda de diversos segmentos da indústria (siderurgia, metalurgia, cimento, etc.), bem como para utilização residencial urbana e rural. A principal utilização, no entanto, se faz ver na indústria de siderurgia. Em 1988, o consumo de carvão vegetal na siderurgia nacional situou-se na ordem de 7,8 milhões de toneladas, ou seja, 86,7% do consumo nacional do produto (CETEC, 1982).

A produção de carvão vegetal é o mais antigo processo de transformação química para a utilização da madeira (GOMES & OLIVEIRA, 1982).

No ano de 2005, a produção nacional foi 5,5 milhões de toneladas. Desse total, 2,5 milhões de toneladas foram oriundos de florestas plantadas. O principal estado produtor é Minas Gerais, com uma produção de 1,74 milhão de toneladas, representando 69% do total (IBGE, 2005).

Com relação à produção de carvão originário de florestas nativas, destacaram-se os estados da Bahia, com 26,9% das 2,97 milhões de toneladas (54%) produzidas no País em 2005; Mato Grosso do Sul, com 18,8%; Maranhão, com 16,9%; Goiás, com 10,8%; e Minas Gerais, com 10,4%. A figura 16 apresenta um histórico da produção nacional de carvão vegetal, de florestas plantadas e de florestas nativas (AMS, 2006).

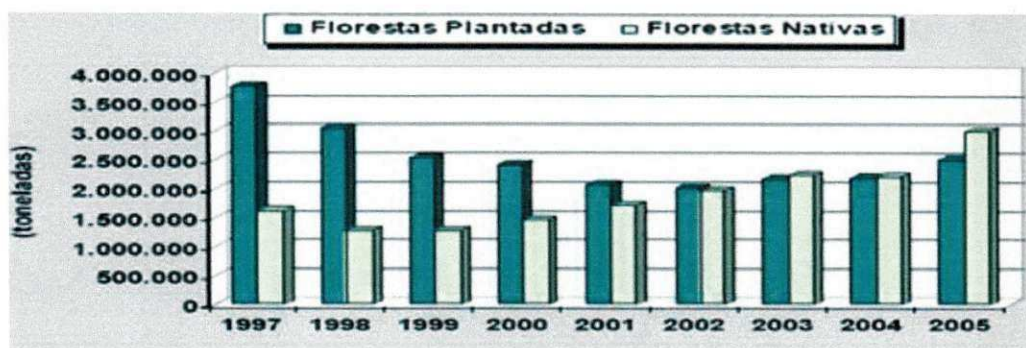


Figura 11: Produção nacional de carvão vegetal de florestas plantadas e de florestas nativas<sup>17</sup>.

<sup>17</sup> e <sup>18</sup> Fonte: AMS Associação Mineira de Silvicultura, 2006.

O consumo total de carvão vegetal em 2005, no Brasil foi de 38,1 milhões de mdc, sendo 19,2 milhões de mdc de origem de floresta plantada e 18,9 milhões mdc de florestas nativas, conforme a figura 17. O estado de Minas Gerais representou 66% (25,2 milhões de mdc) do consumo total (AMS, 2006).

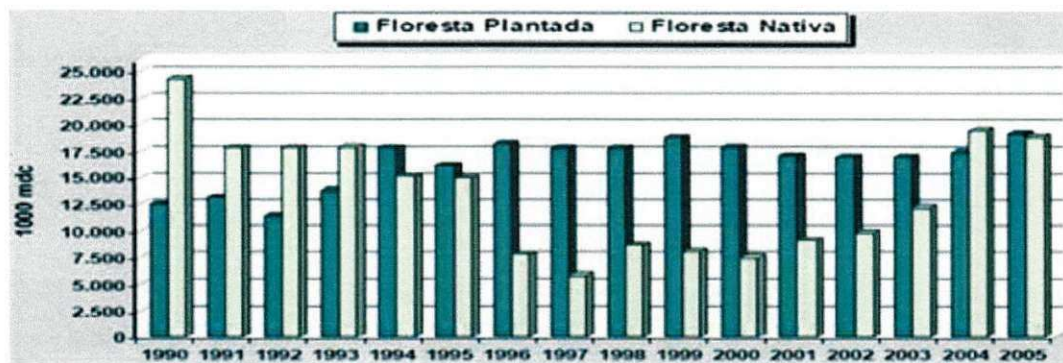


Figura 12: Consumo total de carvão vegetal de florestas plantadas e de florestas nativas.<sup>18</sup>

Na siderurgia, o carvão vegetal, está concentrado pelo menos 1/4 de toda nossa produção de ferro-gusa e 1/2 de toda nossa produção de ferro-liga. Nesse parque, estão lotadas um pouco mais de uma centena de empresas, pertencentes à iniciativa privada (CETEC, 1982).

Computando-se desde a atividade da produção florestal, passando pela atividade de produção de carvão vegetal e de produção siderúrgica, o setor gerou, no ano de 1988, mais de 250 mil empregos, proporcionou uma geração de impostos de quase 400 milhões de dólares e um faturamento de cerca de 3,4 bilhões de dólares no mercado interno e de quase 1,0 bilhão de dólares com exportações (CETEC, 1982).

O Estado de Minas Gerais é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal, consumindo, em média, cerca de 18 milhões de metros cúbicos deste insumo (ABRACAVE, 2002). O carvão vegetal é, preponderantemente, consumido nas indústrias siderúrgicas a ferro-gusa, na qual participa com cerca de 70% do preço da tonelada de gusa (CETEC, 1982).

Para Oliveira & Almeida (1980), a produção e utilização do carvão vegetal como fonte energética está fundamentalmente embasada em dois motivos fundamentais:

- a) por ser uma fonte renovável;
- b) alternativa estratégica para um país carente de reductor fóssil.

#### *- Produção do carvão vegetal*

A pirólise, ou destilação seca da madeira (ou de outra biomassa vegetal), em atmosfera controlada e a temperatura conveniente, produz o carvão vegetal e matéria volátil parcialmente condensável. Da condensação resultam o licor pirolenhoso contendo o ácido pirolenhoso e o alcatrão insolúvel. O licor pirolenhoso compõe-se de ácido pirolenhoso, uma solução aquosa de ácidos acético e fórmico, metanol e alcatrão solúvel e, constituintes menores. O matéria volátil não-condensável consiste de compostos gasosos de carbono ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ ) e nitrogênio. A análise do carvão e de matéria volátil mostra que sua composição depende fortemente da temperatura de carbonização, da espécie vegetal que fornece a madeira, e da idade da árvore. Desta forma, o carvão produzido, a partir de espécies nativas, apresenta certa flutuação nas propriedades físico-químicas e mecânicas, indesejável no processo de produção do ferro-gusa (BRITO, 1990).

A evolução da tecnologia siderúrgica levou naturalmente à necessidade de se padronizar a madeira, através da plantação de espécies selecionadas, com vistas a melhorar, o rendimento em carvão, o seu teor de carbono (carbono fixo), a densidade e outras propriedades mecânicas, requeridas pelo uso em altos-fornos.

O processo de carbonização pode ser esquematizado em 4 etapas:

#### *\* Primeira etapa*

A secagem da madeira, com a vaporização da água absorvida por higroscopia da madeira, da água absorvida através das paredes das células e a água quimicamente ligada, ou de constituição. A faixa de temperatura na secagem vai de 110 a 200 °C. O calor necessário para manter a temperatura adequada provém da queima de parte da madeira, seja na própria câmara de carbonização,

nos fornos de carbonização mais rudimentares, seja em câmara de combustão própria, nos fornos evoluídos.

*\* Segunda etapa*

A pré-carbonização, que se dá no intervalo entre 180-200 °C e 250-300 °C, fase ainda endotérmica em que se obtém uma fração do licor pirolenhoso e pequena quantidade de gases não condensáveis.

*\* Terceira etapa*

A carbonização, reação rápida e exotérmica, iniciada entre 250 e 300 °C, na qual parte da madeira é carbonizada e a maioria do alcatrão solúvel e o ácido pirolenhoso são liberados.

*\* Quarta etapa*

A carbonização final, a temperatura superior a 300 °C, com a formação da maior parte do carvão.

As propriedades físico-químicas e mecânicas do carvão (composição, reatividade a CO<sub>2</sub>, densidade, resistência à compressão, etc.) dependem da composição e da estrutura da madeira, da umidade, das dimensões da tora, da temperatura de carbonização, da taxa de aquecimento da carga no forno e de outras variáveis menos relevantes.

O modo de se operar o forno para se obter carvão de boa qualidade é uma técnica ainda empírica, devido à multiplicidade dos fatores a se considerar e dos meios de monitoração do processo, compatíveis com a estrutura da produção. De fato, a necessidade de se produzir carvão vegetal a preços competitivos com o coque, derivado do petróleo com altíssimo teor de carbono, impõe na atual conjuntura da economia, certa rusticidade aos fornos e ao manejo da matéria prima e dos produtos.

### *- Problemas na utilização do carvão vegetal*

Há dois típicos problemas para a utilização do carvão vegetal, um ligado à matéria-prima e o outro na tecnologia de produção.

#### *Matéria-prima*

O primeiro e, talvez, mais importante dos problemas ligados ao carvão vegetal é o da oferta de matéria-prima para sua produção.

Os dados mais recentes indicam que 78% da matéria-prima usada na obtenção de carvão vegetal, em nosso país, têm origem na mata nativa.

É fato real que a disponibilidade de material lenhoso, proveniente de florestas nativas, permitiu o desenvolvimento crescente da siderurgia a carvão vegetal. A demanda de produtos agrícolas cresceu com a população do país e com o aumento da exportação, criando novas fronteiras de produção.

Não se pode negar que a atividade de produção de carvão vegetal, tal como hoje ela é praticada junto às fronteiras de desenvolvimento agrícola, tem alguns vínculos negativos em relação à questão ambiental. Por outro lado, é importante ponderar-se que, em tais regiões, e numa outra visão do problema, pode-se conceder alguns créditos positivos para a atividade. É que, além do benefício econômico do aproveitamento da madeira, a emissão de gases, e particularmente o CO<sub>2</sub>, é menor do que aquela que ocorre quando simplesmente lança-se mão da combustão total da madeira, como verifica-se nas queimadas das florestas.

É que na carbonização 30 a 40% da madeira submetida ao processo, são recuperados na forma de carvão vegetal e, portanto, não são convertidos em gases. Além de menor, a emissão de gases é diluída ao longo dos meses do ano, e não concentrada na época de estiagem, como ocorre nas queimadas.

Independente desses aspectos, ocorre que a sustentação de uma importante parcela da produção siderúrgica, baseada no carvão vegetal obtido de madeira de matas nativas, está se tornando difícil. A mata nativa está hoje escasseando,

principalmente junto às usinas siderúrgicas, pois grande parte do desenvolvimento agropecuário já se encontra estabelecida nessas áreas.

A consequência disso é o distanciamento cada vez maior dos pontos de produção de carvão vegetal. Tal situação, tem levado os consumidores a empenharem-se no estabelecimento de programas de reflorestamento, com espécies de rápido crescimento para o atendimento da demanda de madeira. No aspecto mais amplo do contexto nacional, os reflorestamentos já conseguem suprir 22% do volume de carvão vegetal consumido em nosso País. No entanto, algumas importantes empresas do setor siderúrgico possuem índices que chegam a 100% de auto-suficiência (BRITO, 1990).

Mencione-se que, de 1979 a 1988, a taxa de consumo de carvão vegetal oriundo da mata nativa mostrou um crescimento de 189%, enquanto que a taxa de consumo de carvão vegetal oriundo de reflorestamentos cresceu 369% no mesmo período. Em 1988, os reflorestamentos forneceram o equivalente a 16 milhões de metros cúbicos de madeira para a produção de carvão vegetal (BRITO, 1990).

A produção de carvão vegetal em 1999 foi 26,9 milhões de metros de carvão, sendo que 70% desse valor foi obtido com madeira de reflorestamento (ABRACAVE, 2001).

Outro ponto importante, ligado à oferta de madeira para a produção de carvão vegetal, diz respeito ao manejo racional das florestas nativas.

### *Tecnologia de produção*

O segundo grande problema envolvido com o carvão vegetal, liga-se à questão da tecnologia empregada na sua produção.

O nosso carvão vegetal é hoje produzido, em sua maior proporção, da mesma forma como o era há um século. A tecnologia é primitiva, o controle operacional dos fornos de carbonização é pequeno e não se pratica o controle qualitativo e quantitativo da produção, demonstrada na Figura13.



Figura13: Foto com visão parcial de baterias de fornos onde se carboniza lenha originária de desmatamento de mata nativa.<sup>19</sup>

Segundo Monteiro (1998), estimou que os custos operacionais que envolviam a produção de uma tonelada de carvão vegetal orbitavam em torno de US\$ 30,00. Tal composição de custos permitiu o estabelecimento de um mercado de carvão vegetal na Amazônia Oriental brasileira, no qual os preços são inferiores aos praticados em Minas Gerais, Estado onde se concentram as indústrias produtoras de ferro-gusa.

Além desses aspectos, a tecnologia atualmente empregada, descarta, através da emissão de gases, milhares e milhares de toneladas de componentes químicos. Conforme mencionado anteriormente, do processo de carbonização, aproveitam-se de 30 a 40% da madeira na forma de carvão vegetal. O restante é simplesmente lançado na atmosfera na forma de gases. Já se demonstrou existência de mais de 100 compostos químicos orgânicos presentes nos gases da carbonização da madeira (FLORESTAL ACESITA S.A ,1982).

Considerando-se os grupos mais importantes de compostos químicos presentes nesses gases, e com base na quantidade de carvão vegetal consumido no Brasil em 1988, foram lançados na atmosfera naquele ano:

---

<sup>19</sup> Fonte: Monteiro, 2002.



- 1,79 milhões de toneladas de gases combustíveis, contendo cerca de 0,50 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>;

- 0,22 milhões de toneladas de ácido acético;

- 0,15 milhões de toneladas de metanol;

- 0,37 milhões de toneladas de produtos leves;

- 0,84 milhões de toneladas de alcatrões.

Apesar da atividade não se encontrar concentrada num único ponto, com grande dispersão de centros de produção no meio rural, o resultado global das emissões de gases é importante, tanto ao nível da perda de produtos químicos valiosos, que poderiam ser economicamente recuperáveis, bem como ao nível de aspectos ambientais.

Preocupadas com a questão, algumas das mais importantes empresas do setor vêm, há vários anos, realizando ações no sentido de estudos e efetivas implantações de sistemas de recuperação desses produtos gasosos para a geração de insumos químicos e energéticos. Algumas empresas têm como rotina a recuperação de parte desses produtos na forma de alcatrão para uso como combustível. Essa tecnologia de recuperação desses produtos são totalmente disponíveis, e tem sido historicamente utilizada em várias partes do mundo.

É evidente, que a adoção de soluções de mais amplo aspecto, para a recuperação de outros produtos da carbonização, implicam em profundas alterações na sistemática, hoje utilizada no Brasil. São alterações que exigem, em primeiro lugar, a adoção de modernas tecnologias e modernos conceitos agroindustriais, fugindo assim da definição que ainda se dá à atividade em nosso país, como sendo algo marginal e secundário da atividade rural. Além disso, exigem somas mais significativas de investimentos iniciais, principalmente se comparados àqueles necessários para a produção de carvão vegetal, pelo modelo tradicional.

No entanto, hoje, a moderna sociedade não mais admite, qualquer que seja a situação ou atividade, a não agregação de custos relacionados à necessidade da minimização dos impactos ao meio ambiente, chegando a vez do carvão vegetal. Se os investimentos são maiores, os ganhos ambientais, no entanto, são muito significativos. Importantes exemplos de possibilidade da produção de carvão vegetal, em total consonância com as modernas conceituações de controle ambiental, podem ser presenciados em várias fábricas do produto, localizadas na Europa, em países como França, Alemanha, Inglaterra, Bélgica, Iugoslávia.

*- Composição elementar do carvão vegetal*

A especificação utilizada pelas siderúrgicas na região do Estado do Maranhão e Pará, está descrita na Tabela 7:

Tabela 7: Especificação do carvão vegetal. <sup>20</sup>

Umidade	8,10 %
Cinzas	7,25%
Material Volátil	20,25%
Carbono Fixo	60 %
Densidade	286,72 kg/m <sup>3</sup>

---

<sup>20</sup> Fonte: Companhia Siderúrgica do Maranhão - COSIMA, 2006.

## 2.8 Finos de carvão

Os finos de carvão, originados pelas caldeiras da Refinaria, foram submetidos a uma análise de classificação pela empresa Cetrel S.A. (Empresa de Proteção Ambiental), localizada no município de Camaçari, Bahia. Os resíduos se classificam em perigosos (Classe I), não inertes (Classe II-A e II-B) e inertes (Classe III).

Os finos de carvão são originados de uma mistura do carvão mineral Australiano e Colombiano, sendo o primeiro estudo de co-produto direcionado a aplicação no setor siderúrgico.

### - *Teor de carbono*

O teor de carbono indica o poder energético, quanto maior o teor de carbono, maior também é o poder energético. Além do poder energético, o carbono funciona como agente redutor.

### - *Teor de enxofre*

O teor de enxofre indica a concentração total dos compostos sulfurosos, presentes no combustível. O enxofre é um elemento indesejável em qualquer combustível devido à ação corrosiva de seus compostos e à formação de gases tóxicos como  $\text{SO}_2$  (dióxido de enxofre) e  $\text{SO}_3$  (trióxido de enxofre), que ocorre durante a combustão do produto.

### - *Poder calorífico*

Define-se poder calorífico como a quantidade de energia interna contida no combustível, sendo que, quanto mais alto for o poder calorífico, maior será energia contida.

Um combustível é constituído, sobretudo de hidrogênio e carbono, tendo o hidrogênio o poder calorífico de 28700 kcal/kg enquanto que o carbono é de 8140

kcal/kg, por isso, quanto mais rico em hidrogênio for o combustível, maior será o seu poder calorífico.

Quando um combustível é queimado na presença de oxigênio e a água é um dos produtos da combustão, a temperatura da chama adiabática é alta o bastante para que a água esteja na fase de vapor. Em muitos trocadores de calor, a temperatura dos produtos da combustão (sua temperatura de saída do trocador de calor) é ainda mais alta que o ponto de ebulição da água e o calor de transformação de vapor é perdido para a atmosfera. Isto reduz o “poder calorífico” do combustível para o seu “Poder Calorífico Inferior”. Se o vapor d’água criado na combustão é condensado, o calor de transformação (condensação) pode ser recuperado e a energia obtida do processo de conversão é aumentada. Estas condições produzem o “Poder Calorífico Superior” do combustível (HILSDORF, 2004).

Como a temperatura dos gases de combustão é muito elevada nos motores endotérmicos, a água contida neles se encontra sempre no estado de vapor, portanto, o que deve ser considerado é o poder calorífico inferior e não o superior.

### 3 OBTENÇÃO DOS FINOS DE CARVÃO

Para a produção do vapor, utilizado na Refinaria, faz-se necessária a queima de carvão mineral nas caldeiras. Como sub-produto desta queima são gerados os finos, que pela sua origem forma denominados, finos de carvão.

A geração atual dos finos de carvão é de 25724 toneladas por ano, com a expansão da unidade da Refinaria, passarão a ser gerados uma projeção de 86400 toneladas, tendo um aumento de 336%, conforme gráfico 1.



Gráfico 1: Geração dos finos de carvão gerado pelo Consorcio de alumínio do Maranhão, ALUMAR, 2006.

Atualmente, a alimentação das caldeiras, por carvão mineral, é feita por quatro alimentadores-espalhadores e a queima se processa, parte em suspensão (partículas finas), parte sobre a grelha rotativa.

Os finos de carvão gerados pela grelha são armazenadas numa moega frontal, que retém 75% do total de finos produzidos, existindo 2 moegas de fundo da grelha, que coletam 1% do total dos finos. O restante se compõe de finos volantes. Antes que os gases saiam pela chaminé, devem-se remover as partículas de finos. As partículas maiores que 40 micra são coletados por dois ciclones (paralelos) e depositadas em moegas. O ciclone primário retém cerca de 90% dos finos transportados, e o secundário cerca de 8%. Destas 4 moegas, 4 válvulas rotativas despejam os finos (volantes) no sistema de reinjeção de finos, por serem carvão

com baixa granulométrica e possuir um alto poder calorífico, são reciclados novamente nas caldeiras.

Há ainda o filtro de mangas, capaz de reter as partículas inferiores a 40 micra e responsável pela coleta de 2% dos finos transportados. São formados por 8 compartimentos cada qual podendo funcionar independente um do outro. Após o filtro há um ventilador de tiragem induzida que succiona os gases de combustão, a fim de manter a fornalha sob uma pressão de 2 mm.c.a. Daí, os gases já podem ser expelidos pela chaminé.

Os finos, com exceção dos acumulados no ciclone (onde parte são reinjetados), são então transportados pelo sistema de vácuo, gerado por um conjunto de bombas de vácuo, para o silo de estocagem (Silo 14) com capacidade para 350 toneladas. O transporte de finos volantes e de fundo é interligado. Este processo está demonstrado no esquema da figura 14. Em seguida, os finos do silo 14 (Figura 15) e dos ciclones (Figura 16) são transportados e dispostos em um pátio específico para estocagem (Figura 17 e 18).

Os pontos de acúmulo dos finos de carvão nas caldeiras da ALUMAR estão demonstrados na figura 14.

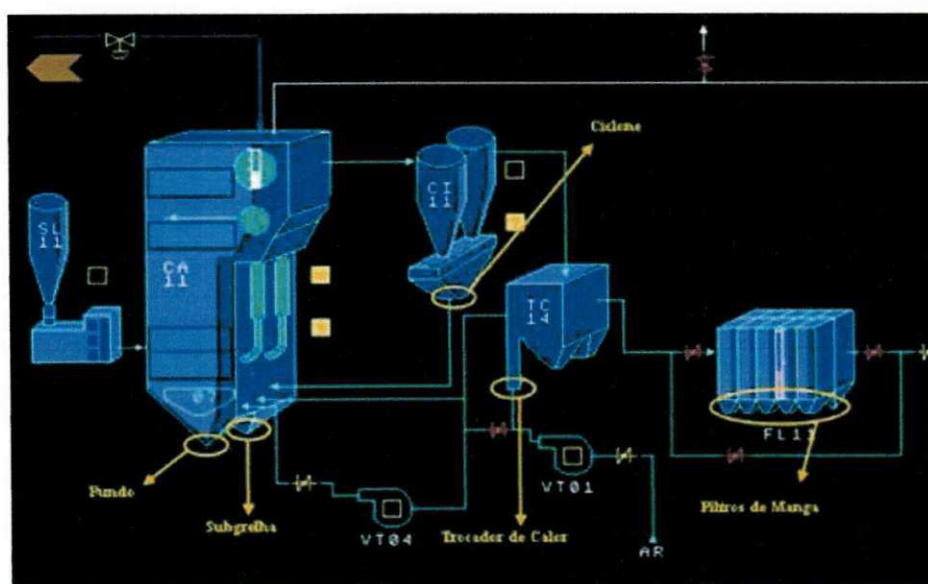


Figura 14: Pontos de acúmulo dos finos de carvão nas caldeiras da ALUMAR.

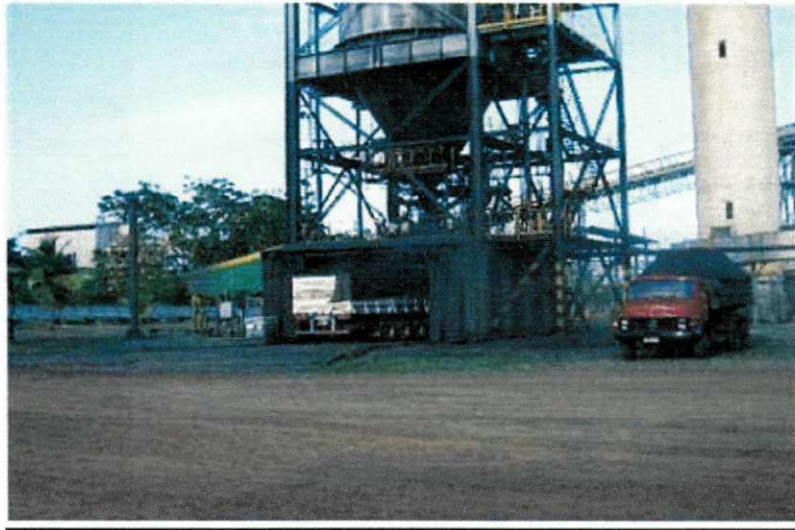


Figura 15: Ponto de retirada dos finos de carvão do silo 14, Refinaria da ALUMAR.



Figura 16: Ponto de retirada dos finos de carvão do ciclone, Refinaria da ALUMA.



Figura 17: Pátio de estocagem dos finos de carvão nas caldeiras da ALUMAR.



Figura 18: Movimentação dos finos de carvão no pátio de estocagem, Refinaria ALUMAR.



## 4 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

### 4.1 Preparação das composições.

Foram preparadas três composições, com proporções que variam de 0% a 100% , em massa da relação percentual de finos de carvão substituindo o carvão vegetal, conforme Tabelas 8, 9 e 10, onde serão avaliados os teores de carbono, enxofre, poder calorífico de cada uma das amostras.

A composição 1 foi formada pelo carvão vegetal e fino de carvão do ciclone, variando o percentual em cada amostra, conforme descrito na Tabela 8.

Tabela 8: Composição 1(carvão vegetal e finos de carvão do ciclone)

Amostra	Carvão vegetal (%)	Finos de carvão (%) CICLONE
<b>A-01</b>	100	0
<b>A-02</b>	75	25
<b>A-03</b>	50	50
<b>A-04</b>	25	75
<b>A-05</b>	0	100

A composição 2 contém carvão vegetal e finos de carvão do silo 14, variando o percentual em cada amostra, conforme descrito na tabela 9.

Tabela 9: Composição 2 (carvão vegetal e finos de carvão do silo14)

Amostra	Carvão vegetal (%)	Finos de carvão (%) SILO 14
<b>B-01</b>	100	0
<b>B-02</b>	75	25
<b>B-03</b>	50	50
<b>B-04</b>	25	75
<b>B-05</b>	0	100

A composição 3 contém carvão vegetal, finos de carvão do ciclone e finos de carvão do silo 14, variando o percentual em cada amostra, conforme descrito na tabela 10.

Tabela 10: Composição 3 (carvão vegetal e finos de carvão do ciclone e silo14)

Amostra	Carvão vegetal (%)	Finos de carvão (%)	
		CICLONE	SILO 14
C-01	100	0	0
C-02	75	12,5	12,5
C-03	50	25	25
C-04	25	37,5	37,5
C-05	0	50	50

A metodologia usada na preparação das amostras seguiu a Norma e Procedimentos da empresa ALUMAR, tendo como fonte ASTM Standart Method of Preparing Coal Samples For Analysis (ASTM D 2013 – 72).

A amostra passa por um tratamento de secagem (somente o carvão) e quarteamento. Após esse processo, é passada no britador de mandíbulas com abertura de 34 de polegadas e em seguida a amostra é pulverizada em moinho de panela e passada em peneira de 60 mesh.

Em seguida foram pesados  $20g \pm 0,1g$ , em copo plástico, conforme figuras 19 e 20, identificados e transferidos para uma lona de homogeneização, onde ocorre a completa homogeneização. Transferidos para o frasco de plástico de 500 ml, devidamente identificado, para em seguida proceder as análises.



Figura 19: preparação das amostras.



Figura 20: pesagem das amostras.

## 4.2 Análises realizadas

A primeira análise realizada foi à classificação do resíduo, onde os finos de carvão do silo 14 e do ciclone, com base no Standard Method for Examination of Water and Wastewater, 20ª edição de 1998 e pela metodologia da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. A metodologia usada foi de acordo com as normas NBR 10004/04, resíduos sólidos, NBR 10005/04, lixiviação de resíduos, NBR 10006/04, solubilização de resíduos.

Foi realizada também uma análise de caracterização dos finos de carvão do silo 14 e ciclone, como base na Standard Method for Examination of Water and Wastewater, 20ª edição de 1998 e pela metodologia da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. Esta análise tem o objetivo de avaliar os elementos químicos em relação à fase inicial de chegada do carvão mineral oriundos da Austrália e Colômbia.

As análises químicas do carvão mineral oriundas da Austrália e Colômbia, foram cedidas pela empresa ALUMAR.

As quinze amostras, 15, foram feitas em duplicata e analisadas no laboratório da refinaria da empresa ALUMAR, tendo como parâmetros teores de carbono, enxofre e poder calorífico.

Foi realizada uma redução com os finos de carvão e o carvão vegetal para avaliar se há alterações nas características químicas do ferro-gusa, onde a especificação da análise química foi cedida pela empresa COSIMA conforme tabela 11.

Tabela 11: Especificação dos elementos químicos do ferro-gusa.<sup>21</sup>

Especificação da COSIMA Análise Química	
Elementos	Especificação (%)
Si	0 - 1.5
P	Max 0,080
Mn	Max 1
C	3,5 - 4.5
S	Max 0.050

#### 4.2.1 Teor de carbono

A amostra sofre combustão no forno a elevada temperatura. Durante a queima, o carbono é convertido em CO<sub>2</sub>, os gases produzidos são conduzidos a uma seqüência de filtros contendo perclorato de magnésio, lã de vidro e ascaride, ficando outros gases que não o CO<sub>2</sub> retidos nestes filtros. O gás carbônico absorve radiação eletromagnética em um comprimento de onda dentro do Espectro Infravermelho.

O gás CO<sub>2</sub> produzido é conduzido através do corpo de uma célula detecção. A célula de leitura consiste de uma fonte de infravermelha, um motor, um filtro que separa um comprimento de onda específico, um cone de condensação, um detector de energia infravermelha e o corpo da célula.

O detector mede a quantidade de energia que chega e converte em sinais elétricos. Uma curva de calibração relaciona a perda de sinal no detector (devido à absorção de energia pelo CO<sub>2</sub>) com o percentual de carbono na amostra (LECO CORPORATION IR-212).

<sup>21</sup> Fonte: Companhia Siderúrgica do Maranhão - COSIMA, 2006.

### *Materiais e equipamentos*

Materiais: cadinho para Leco, espátula, placa de sinalização, pinça para cadinho, pincel, placa de material refratário, tubo de vidro.

Equipamentos: Leco IR- 212, equipado com balança, microprocessador, sistema de detecção, sistema de aquecimento.

#### 4.2.2 Teor de enxofre

A amostra sofre combustão em um forno à temperatura de 2500 °F ( $\pm$  1371°C), num ambiente rico em oxigênio, onde o enxofre é convertido em SO<sub>2</sub>. Uma bomba de vácuo aspira os gases gerados pela queima e direciona para um sistema de detecção por infravermelho. O sistema de infravermelho produz uma radiação que só é absorvida pelo SO<sub>2</sub> presente na amostra. A perda de umidade dos raios infravermelhos é convertida em sinal elétrico via detector de estado sólido. Este sinal proporciona a quantidade de SO<sub>2</sub> gerado. O sinal elétrico é convertido em percentagem de enxofre, via fatores de calibração previamente determinados com padrões de concentrações conhecidas. (LECO CORPORATION SC-132781-400)

O equipamento utilizado para análise de enxofre neste trabalho é o LECO SC132, Figura 21.



Figura 21 - Equipamento LECO SC 132 utilizado para análise de enxofre.

#### - *Materiais e equipamentos*

Materiais: lâ de vidro, padrão de óleo, padrão de carvão, padrão de coque, perclorato de magnésio ( $Mg(ClO_4)_2$ ), óxido de magnésio (COM-AID), oxigênio super seco.

Equipamento e vidraria: Leco SC 132 e acessórios descritos no manual do equipamento, barquete de refratário, espátula metálica, pinça de haste curta, pinça de haste longa, placa de refratário, placa de superfície quente, tubo de vidro.

#### 4.2.3 Poder calorífico

O poder calorífico das amostras foi determinado pelo calorímetro Parr, pela queima das amostras numa atmosfera de oxigênio em bomba calorimétrica sob condições controladas. A queima das amostras libera calor, e esta liberação de calor é medida pelo aumento de temperatura do banho de água que envolve a bomba em intervalos de tempo específicos. A elevação da temperatura é usada para calcular o poder calorífico (CALORÍMETRO PARR 1261).

Um combustível é constituído, sobretudo de hidrogênio e carbono, tendo o hidrogênio o poder calorífico de 28700 kcal/kg enquanto que o carbono é de 8140

kcal/kg, por isso, quanto mais rico em hidrogênio for o combustível, maior será o seu poder calorífico.

Quando um combustível é queimado na presença de oxigênio e a água é um dos produtos da combustão, a temperatura da chama adiabática é alta o bastante para que a água esteja na fase de vapor. Em muitos trocadores de calor a temperatura dos produtos da combustão (sua temperatura de saída do trocador de calor) é ainda mais alta que o ponto de ebulição da água e o calor de transformação de vapor é perdido para a atmosfera. Isto reduz o “poder calorífico” do combustível para o seu “Poder Calorífico Inferior”. Se o vapor d’água criado na combustão é condensado, o calor de transformação (condensação) pode ser recuperado e a energia obtida do processo de conversão é aumentada. Estas condições produzem o “Poder Calorífico Superior” do combustível (HILSDORF, 2004).

Como a temperatura dos gases de combustão é muito elevada nos motores endotérmicos, à água contida neles se encontra sempre no estado de vapor, portanto, o que deve ser considerado é o poder calorífico inferior e não o superior.

O poder calorífico das amostras foi determinado pelo calorímetro Parr, Figura 22, pela queima das amostras numa atmosfera de oxigênio em bomba calorimétrica sob condições controladas. A queima das amostras libera calor, e esta liberação de calor é medida pelo aumento de temperatura do banho de água que envolve a bomba em intervalos de tempo específicos. A elevação da temperatura é usada para calcular o poder calorífico (CALORÍMETRO PARR 1261).



Figura 22: Calorímetro Parr 1261 análise do poder calorífico das amostras.



*- Materiais e equipamentos*

Materiais: reagentes de ácido benzóico P.A. em Pastilha, ( $C_6H_5COOH$ ), álcool Etílico, ( $C_2H_6O$ ), carbonato de Sódio Anidro P.A. ( $Na_2CO_3$ ), alaranjado de Metila, ( $C_{14}H_{14}N_3SO_3Na$ ), xileno cianol FF, ( $C_{25}H_{27}N_2NaO_7S_2$ ).

Equipamentos e vidrarias: balança, balde inox, bureta automática, bomba de recirculação de água, bomba calorimétrica parr 1108 em aço inox, 550 mL, calorímetro parr 1261, cápsula, estufa de aquecimento de  $110^\circ C$  com variação de  $\pm 2^\circ C$ , fio de níquel/cromo, grampo para manuseio da bomba, impressora PARR 1755, refrigerador parr, régua, suporte para tampa da bomba, tesoura, termômetro, balão volumétrico de 1000 mL, béquer de vidro 400 e 1000 mL, pipeta volumétrica de 10 mL, béquer plástico de 250 mL, funil de vidro, bastão magnético.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Classificação dos Finos de Carvão (Co-produto)

Com base nos resultados pela empresa Cetrel, os finos de carvão do ciclone, conforme a Norma Brasileira NBR 10004 de 2004, este co-produto não é corrosivo, tendo os parâmetros de selênio, alumínio e índice de fenóis no material solubilizado acima do valor legislado, conforme tabela 12, o que enquadraria este co-produto como resíduo classe II A – resíduo não inerte.

Tabela 12: análise de classificação de resíduo dos finos de carvão do ciclone. <sup>22</sup>

Parâmetro analisado	Solubilizado (mg/L)	
	AMOSTRA	NBR 10004
Selênio	0,017	0,01
Alumínio	8,2	0,2
Índice de Fenóis	0,017	0,01

Os finos de carvão do silo 14, conforme a Norma Brasileira NBR 10004 de 2004, este co-produto também apresenta a não corrosividade, tendo os parâmetros de arsênio, fluoreto, selênio, alumínio e sulfato no material solubilizado acima do valor legislado, conforme tabela 13, o que enquadraria este co-produto como resíduo classe II A – resíduo não inerte.

<sup>22</sup> Fonte: Empresa de proteção ambiental - CETREL, 2006.

Tabela 13: análise de classificação do resíduo dos finos do silo 14.<sup>23</sup>

Parâmetro analisado	Solubilizado (mg/L)	
	AMOSTRA	NBR 10004
Arsênio	0,022	0,01
Fluoreto	8,2	0,2
Selênio	0,15	0,01
Alumínio	0,25	0,2
Sulfato	973	250

<sup>23</sup> Fonte: Empresa de proteção ambiental - CETREL, 2006.

## 5.2 Determinação da composição química e calores de energia das misturas

A fonte dos finos de carvão gerado pela empresa é o carvão mineral vindo da Austrália e da Colômbia. A composição desse carvão mineral desses países está demonstrada na Tabela 14.

Tabela 14: Análise química do carvão mineral vindo da Austrália e Colômbia. <sup>24</sup>

Analise Elementar	Austrália (%)	Colômbia (%)
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	22,5	22,96
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	4,2	6,83
<b>CaO</b>	5,0	----
<b>MgO</b>	1,4	0,05
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,29	0,42
<b>SiO<sub>2</sub></b>	60,6	60,15
<b>Carbono</b>	57	66,66
<b>Enxofre</b>	0,5 – 1,1	0,57
<b>P.Calorífico (MJ/KG)</b>	20,08	26,00
<b>Umidade</b>	8 - 10	9 - 11

Como pode ser observado o teor de carbono do carvão colombiano é superior, 17%, a mais que o carvão australiano. O teor de enxofre no produto australiano tem uma faixa de variação elevada, o mesmo não ocorre no colombiano e em ambos os produtos o teor de sílica é elevado.

Os finos de carvão obtidos no ciclone e silo14 foram analisados, obtendo os seguintes resultados, conforme tabela 15.

<sup>24</sup> Fonte: Consorcio de Alumínio do Maranhão – ALUMAR, 2006.

Tabela 15: Composição elementar do Ciclone e Silo 14.<sup>25</sup>

Elementos	<i>Identificação das Amostras</i>			
	Cinzas 01 (ciclone)	Cinzas 02 (ciclone)	Cinzas 03 (silo14)	Cinzas 04 (silo14)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( % )	10,57	10,14	11,11	11,61
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( % )	5,23	5,81	3,65	3,72
CaO ( % )	2,74	2,94	1,93	1,98
MgO ( % )	1,26	1,15	0,92	0,95
Na <sub>2</sub> O ( % )	0,43	0,38	0,52	0,53
K <sub>2</sub> O ( % )	0,20	0,19	0,32	0,32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( % )	0,20	0,21	0,29	0,30
SiO <sub>2</sub> ( % )	11,91	11,57	11,60	12,25
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( % )	0,04	0,04	0,04	0,04
Carbono ( % )	51,85	48,95	51,10	52,16
Enxofre ( % )	0,36	0,40	0,55	0,55
P.Calorífico (MJ/KG)	16,08	16,06	16,28	17,16

Pode-se observar que a média do teor de carbono dos finos de carvão do ciclone e silo 14 é de 51%. Em relação ao carvão mineral australiano houve uma redução de 10,53% e do colombiano 23,88% no teor de carbono.

Para efeito de aplicação nas usinas siderúrgicas foram testadas misturas onde se partiu da condição hoje utilizada, com 100% de carvão vegetal e foi feita uma substituição gradual de carvão de origem vegetal pelo fino de carvão das quatro fontes geradoras: 75%-25%; 50%-50%; 25%-75% e 100% de finos de carvão (tabelas 8, 9 e 10).

<sup>25</sup> Fonte: Consorcio de Alumínio do Maranhão – ALUMAR, 2006.

As tabelas abaixo, contem os resultados médios obtidos de cada análise das composições 1,2 e 3, referentes ao poder calorífico, teor de enxofre e teor de carbono, representado respectivamente pelas tabelas 16, tabela 17 e tabela 18.

Tabela 16: Resultado da composição 1 (carvão vegetal x finos de carvão-ciclone).

AMOSTRA	Carvão vegetal	Finos de Carvão-CICLONE	Poder Calorífico (MJ/Kg)	Teor de Enxofre %	Teor de Carbono %
A-01	100%	0%	27,467	0,645	74,280
A-02	75%	25%	27,552	0,579	80,504
A-03	50%	50%	27,605	0,553	82,295
A-04	25%	75%	27,730	0,453	87,938
A-05	0%	100%	28,039	0,396	92,578

Cv : Carvão vegetal

Ci : Finos de carvão do ciclone

Na tabela 16 observa-se que a substituição gradativa do carvão vegetal por finos de carvão do ciclone provoca um aumento do teor de carbono de 74% para 98%, disponibilizando cerca de 24% de carbono a mais para a redução do ferro. Se a mistura for destinada a uso como combustível, observa-se que o teor de enxofre diminui e o poder calorífico aumenta. Isso vem mostrar a qualidade do fino de carvão obtido nos ciclones.

Tabela 17: Resultado da composição 2 (carvão vegetal x finos de carvão-silo 14).

AMOSTRA	Carvão vegetal	Finos de Carvão-SILO 14	Poder Calorífico (MJ/Kg)	Teor de Enxofre %	Teor de Carbono %
B-01	100%	0%	27,467	0,645	74,280
B-02	75%	25%	24,701	0,629	71,147
B-03	50%	50%	21,826	0,623	66,505
B-04	25%	75%	20,250	0,634	62,216
B-05	0%	100%	17,067	0,636	58,541

Cv : Carvão vegetal

S14 : Finos de carvão do silo 14

Já, para o fino de carvão obtido nos silos a mistura provocou uma diminuição do poder calorífico, que caiu de 27% do carvão vegetal puro, para 17% quando foi

analisado a amostra com 100% de finos de carvão. Isso vem mostrar que o fino de carvão coletado nos silos é mais pobre que o do ciclone, fato que pode ser confirmado quando analisamos o teor de carbono que caiu de 74 % para 58%.

Quando procurou se observar a substituição do carvão vegetal por uma mistura em proporções iguais de finos de carvão do silo e ciclone, observa-se que o teor de carbono se manteve ao redor de 75%, porém o teor calorífico caiu de 27% para 22%.

Tabela 18: Resultado da composição 3 (carvão vegetal x finos de carvão-ciclone e silo 4).

AMOSTRA	Carvão vegetal	Finos de Carvão-CICLONE	Finos de Carvão-SILO 14	Poder Calorífico (MJ/Kg)	Teor de Enxofre %	Teor de Carbono %
C-01	100%	0%	0%	27,466	0,645	74,280
C-02	75%	12,5%	12,5%	25,843	0,593	74,253
C-03	50%	25,0%	25,0%	25,025	0,588	74,902
C-04	25%	37,5%	37,5%	22,584	0,532	75,359
C-05	0%	50%	50%	20,143	0,475	76,146

Cv = Carvão vegetal Ci = Finos de carvão do ciclone S14 = Finos de carvão do silo 14

Na composição 1, que temos o carvão vegetal e os finos de carvão do ciclone, o poder calorífico representado no gráfico 2, apresentou um pequeno aumento, variação de 2,08% no seu do poder calorífico em relação ao carvão vegetal.

PODER CALORÍFICO  
COMPOSIÇÃO 01

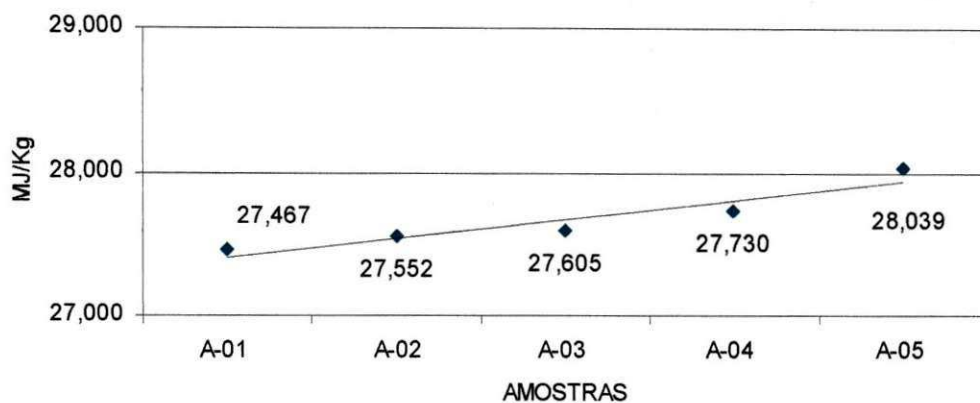


Gráfico 2: Poder calorífico - carvão vegetal x finos de carvão do ciclone.

Com relação ao teor de enxofre, representado no gráfico 3, ocorreu uma redução de 38,60% em relação ao teor do carvão vegetal, sendo muito favorável este resultado para o produto.

TEOR DE ENXOFRE %  
COMPOSIÇÃO 01

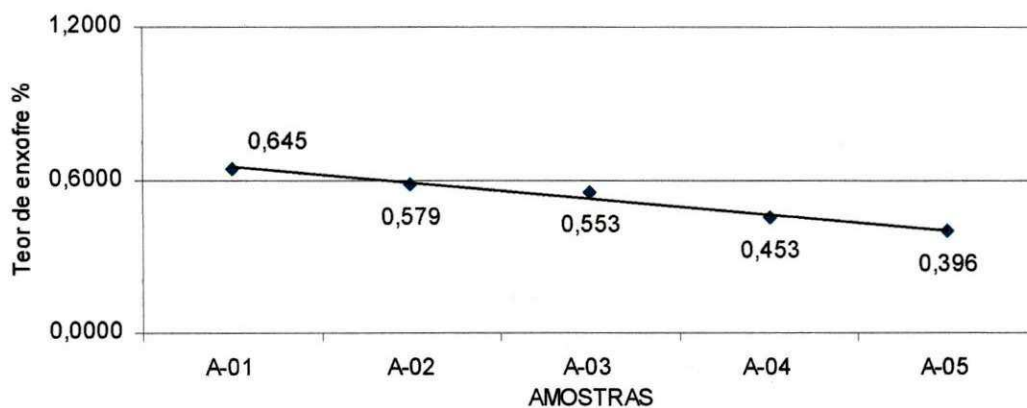


Gráfico 3: Teor de enxofre - carvão vegetal x finos de carvão do ciclone.



O teor de carbono, representado no gráfico 4, há um aumento de 24,63% em relação ao teor do carvão vegetal, deixando o produto com característica importante para o setor siderúrgico.

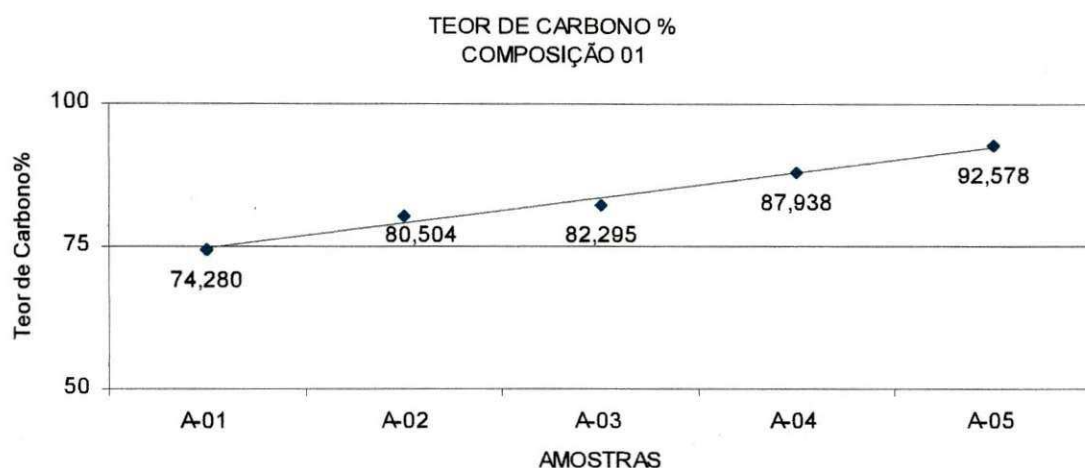


Gráfico 4: Teor de carbono - carvão vegetal x finos de carvão do ciclone.

Na composição 2, que temos o carvão vegetal e os finos de carvão do silo 14, o poder calorífico representado no gráfico 5. Neste caso o poder calorífico reduziu em 37,86% em relação ao carvão vegetal, comprometendo muito a qualidade final do produto.

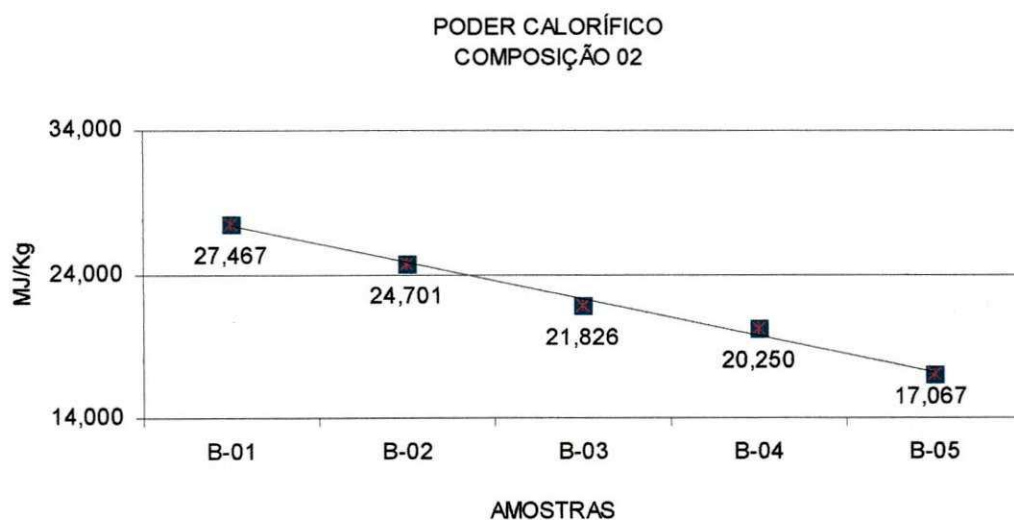


Gráfico 5: Poder calorífico - carvão vegetal x finos de carvão do silo 14.

O teor de enxofre, da composição 2 representada no gráfico 6, ocorreu uma redução de 7,59%, em relação ao teor do carvão vegetal. Com esta redução é possível manter a qualidade do material para atender o setor siderúrgico, pois há interesse em teores baixos de enxofre no seu processo.

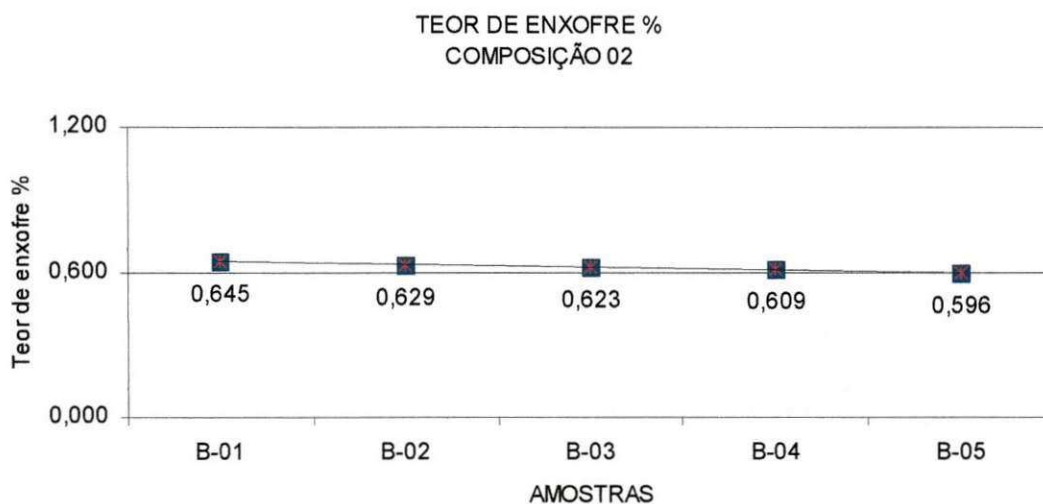


Gráfico 6: Teor de enxofre - carvão vegetal x finos de carvão do silo 14.

O teor de carbono, representado no gráfico 7, houver uma redução de 21,19% em relação teor do carvão vegetal, comprometendo a qualidade do produto final.

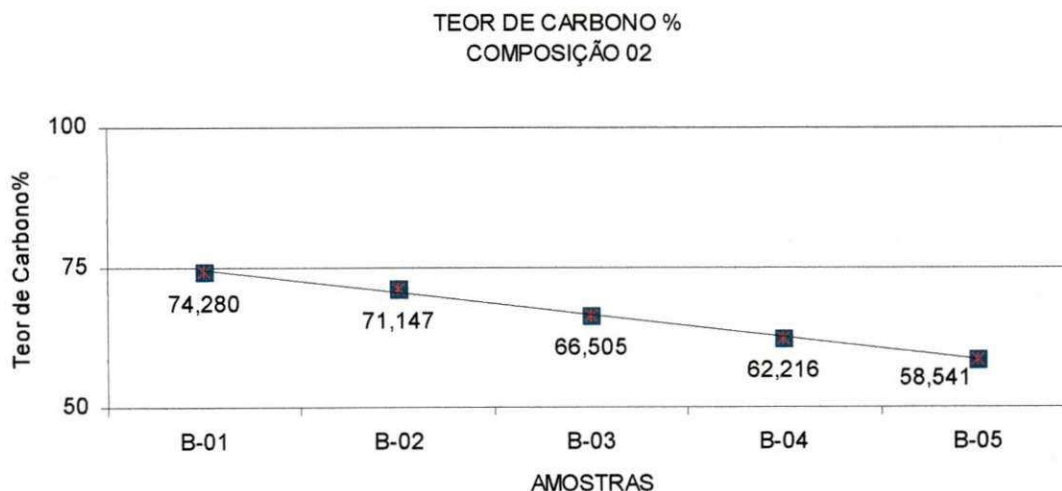


Gráfico 7: Teor de carbono - carvão vegetal x finos de carvão do silo 14.

A composição 3 foi formulada, com objetivo de se obter um produto final utilizando as três misturas, o carvão vegetal, finos de carvão do ciclone e do silo 14.

O poder calorífico, representado no gráfico 8, apresentou uma redução de 26,66%, em relação ao carvão vegetal. Tendo a amostra C-03, uma redução 8,88% em relação ao carvão vegetal, sendo uma relação que continua agregando o produto final.

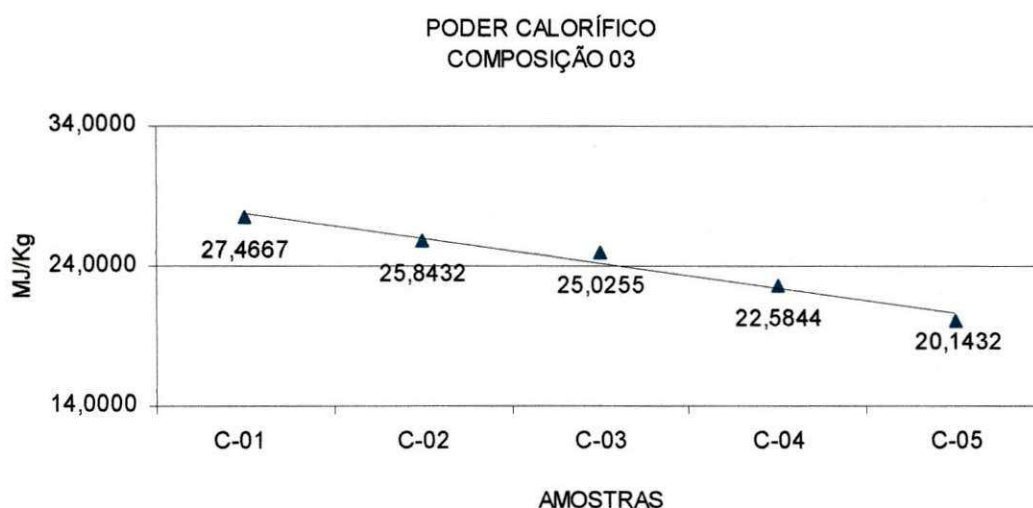


Gráfico 8: Poder calorífico - carvão vegetal x finos de carvão do ciclone e do silo 14.

O teor de enxofre neste caso, representado no gráfico 9, reduziu em 26,30% em relação carvão vegetal. A composição C-03, reduziu em 8,73% este teor , garantindo o atendimento no processo siderúrgico.

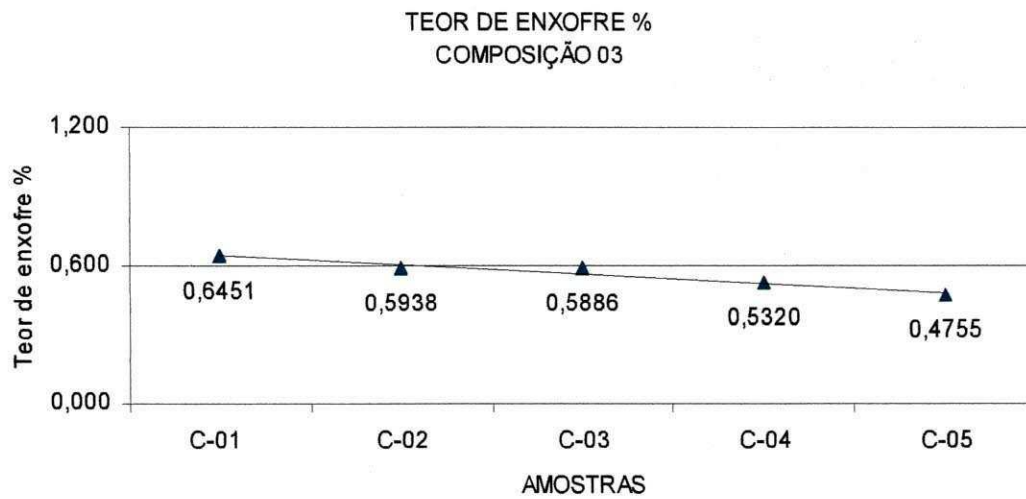


Gráfico 9: Teor de enxofre - carvão vegetal x finos de carvão do ciclone e do silo 14.

No gráfico 10, representado o teor de carbono, houve um pequeno aumento na variação, de 2,51%, em relação ao carvão vegetal.

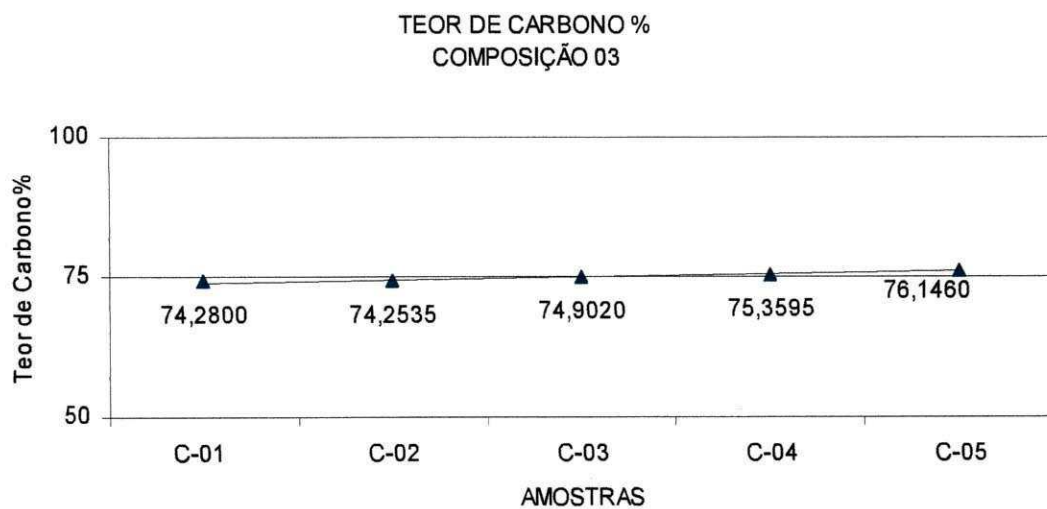


Gráfico 10: Teor de carbono - carvão vegetal x finos de carvão do ciclone e do silo 14.

Sobre o teor de materiais voláteis, há um estudo desenvolvido no trabalho de utilização de zeólita preparada a partir de cinza residuária de carvão mineral nacional, como adsorvedor de metais em água, com objetivo de determinar a eficiência de zeólitas sintetizadas, a partir de cinzas residuárias de carvão em remover cádmio, zinco e cobre de soluções aquosas, e foi observado que o material volátil do carvão mineral, após sua queima, reduz em grande quantidade (FUNGARO e SILVA, 2002).

### **5.3 Realização das reduções de ferro**

Foram realizadas quinze amostras, 15, em duplicata, no laboratório da ALUMAR, visando promover a redução do ferro, dentro das composições previstas. Nesses experimentos ocorreram vazamentos dos cadinhos pela perfuração causada pela reação do carbono com os finos de carvão e do carvão vegetal com o dióxido de silício. Para aproximadamente 10 cadinhos utilizados nos experimentos aproximadamente 7 apresentavam vazamentos. Esses vazamentos inviabilizaram uma avaliação estatística do efeito da proporção da mistura das fontes de carvão com a qualidade do ferro obtido no final da redução, visto que parte do carbono disponível era consumido da redução do silício (componente do cadinho de porcelana).

Para a realização de tais reduções seria necessária a aquisição de cadinhos especiais, que não foi possível à aquisição em tempo hábil.

Foram enviadas três amostras da composição 3, C-03, em proporções iguais, com peso de 1 kg de material para análise. Esta amostra utiliza 50% do carvão vegetal, 25% dos finos de carvão do ciclone e 25% dos finos de carvão do silo 14, onde o minério de ferro e os fundentes foram adicionados posteriormente. O período dessas análises foi de 12 a 27 de novembro de 2006. A escolha desta amostra C-03 foi feita devido à estratégia da empresa ALUMAR disponibilizar este co-produto com

este percentual, onde com as análises anterior avaliou-se que os finos de carvão do ciclone apresentam excelente características para o setor siderúrgico, não sendo o caso dos finos de carvão do silo 14. A blendagem terá que ser realizada para atender a necessidade da empresa ALUMAR.

Os resultados obtidos foram:

Tabela 19: Resultados obtidos da redução com minério de ferro e insumos.

Amostras	Rendimento de Ferro%	Si %	P %	Mn %	C %	S %
<b>A1</b>	29	0,30	0,042	0,69	4,25	0,019
<b>A2</b>	32	0,27	0,036	0,61	3,99	0,017
<b>A3</b>	38	0,32	0,031	0,64	4,31	0,021

O rendimento obtido do ferro foi médio, devido a pouco tempo de exposição do material no processo de redução, porém os elementos como silício, fósforo, manganês e enxofre apresentaram níveis favoráveis ao produto obtido.

Quando se analisa os resultados obtidos quanto a variação dos elementos, com as especificações cedidas pela siderúrgica COSIMA, observa-se um teor de silício praticamente o dobro exigido, teores de fósforo e manganês com valores inferiores ao máximo previsto. Para o teor de carbono os valores encontrados estão localizados dentro do mínimo e do máximo.

Antes do envio deste material para análise, foi realizada, no laboratório da ALUMAR, a redução de 15 amostras, em duplicada, com as composições determinadas, onde o resultado não obteve sucesso, devido aos cadinhos de grafite não suportarem muito tempo de exposição na mufla, que apresentou um desgaste muito elevado, conforme figuras 23, 24 e 25.



Figura 23: Preparação das amostras na mufla.

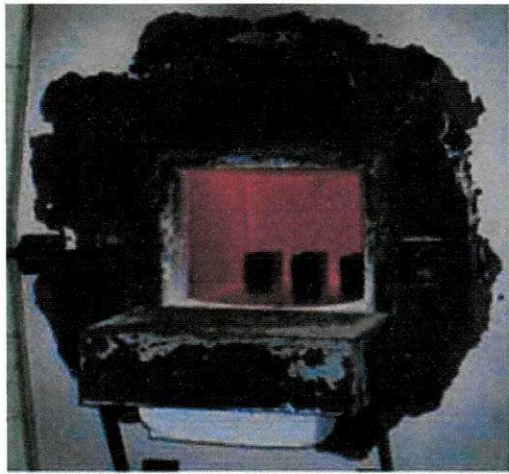


Figura 24: Cadinhos na mufla.



Figura 25: Operação nas muflas – Laboratório ALUMAR.



Figura 26: Desgaste físico dos cadinhos de grafite



## 6 CONCLUSÃO

O uso dos finos de carvão apresenta-se, atualmente, como uma alternativa inovadora na substituição parcial de combustíveis tradicionais.

A composição 1, utilizando os finos de carvão do ciclone, apresentou características favoráveis no uso parcial junto ao carvão vegetal, garantindo sua utilização sem grandes perdas em relação ao carvão vegetal. O poder calorífico obteve um pequeno aumento de 2,08%, e o teor de carbono, um aumento de 24,63% em relação ao carvão vegetal. O teor de enxofre, que muito preocupa o setor siderúrgico, apresentou uma grande redução, de 38,60%.

A composição 2, que utiliza os finos de carvão do silo 14, não apresentou resultados favoráveis, tornando-se um implicador em sua utilização parcial ao carvão vegetal, devido as perdas das propriedades química.

A composição 3 que apresenta os três componentes, carvão vegetal, finos de carvão do ciclone e do silo 14, apresentou resultados que favorecem sua utilização parcial com o carvão vegetal. A amostra C-03, que utiliza 50% do carvão vegetal, 25% dos finos de carvão do ciclone e 25% dos finos de carvão do silo 14, atende os objetivos estratégicos da empresa, sendo a reutilização apenas dos finos de carvão do ciclone não tornaria viável economicamente. O resultado obtido da dessa amostra foi uma redução de 8,88% no poder calorífico e 8,76% no teor de enxofre em relação ao carvão vegetal. Já o teor de carbono teve uma pequena variação.

O resultado geral deste estudo nos mostra que é viável a utilização parcial dos finos de carvão gerados pela empresa ALUMAR para o setor siderúrgico, sendo atualmente utilizado apenas em cimenteiras.

As dificuldades encontradas em sua utilização seriam a granulometria dos finos de carvão, devido aos exaustores dos alto-fornos sugarem este produto para seus filtros, dificultando as reações que necessitam do carbono existente no produto e as siderúrgicas atender as Normas e Políticas Ambientais. Há estudos e

aplicações sendo direcionadas na injeção de carvão vegetal pulverizado em algumas siderúrgicas.

Assim, a comercialização dos finos de carvão traz grandes benefícios econômicos e ambientais; atendendo à Política ambiental da ALUMAR e seus requisitos de sustentabilidade, eliminando material estocado, os custos operacionais de manutenção da área, a construção de novos pátios de estocagem (desmatamentos e alteração da fauna e flora local), e possíveis emissões fugitivas.

## **7 SUGESTOES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Para trabalhos futuros, poderá ser avaliada a utilização dos finos de carvão no sistema de injeção de finos desenvolvidos por algumas siderúrgicas na região, bem como sua utilização na fabricação dos anodos, elemento importante na fabricação do alumínio nas cubas podendo contribuir com a reutilização do produto na própria planta da empresa.

Enfim, este produto poderá ser avaliado, também, na fabricação de materiais cerâmicos, cimenteiras, pavimentação e construção civil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALUMAR - **Relatório técnico da Refinaria da ALUMAR**, 2003.

ARAÚJO, L.A. de. **Siderurgia**. São Paulo: F.T.D. , 1967.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTA RENOVÁVEIS-ABRACAVE. **Anuário estatístico online**. Disponível em: <<http://www.abracave.com.br>>. Acesso em: 20 jan. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS RENOVÁVEIS - ABRACAVE .  
**Anuário estatístico**. Belo Horizonte, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL

<http://www.abal.org.br/quem/abal.asp>.

ASSOCIAÇÃO DAS SIDERÚRGICAS DE CARAJÁS - ASICA, 2004.

<http://www.asica.com.br>

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA - AMS, **Anuário**. [08.09.2006].

<http://www.silviminas.com.br/anuario.htm>.

ASTM STANDARD, **Standart Method of Preparing Coal Samples For Analysis - ASTM – D2013-72**.

ASTM STANDARD. **Standard Test Method for " VOLATILE MATTER IN THE ANALYSIS SAMPLE OF COAL AND COKE"** , ASTM D 3175 – 82.

BRITO, José Otávio. Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais. **Estudos Avançados**, São Paulo, v.4, n.9, p.221-227, agosto 1990.

BRITO, José Otávio. **Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira**. São Paulo: Escola Superior Luis de Queiroz, 1990, v.9.

CETEC - **Produção e utilização do carvão vegetal**. Belo Horizonte: Série Publicações Técnicas. Belo Horizonte 008 – 1982.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica**, São Paulo: McGraw-Hill, 1986, v 2.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1986

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM, 2002.

<http://www.dnpm.gov.br/>

EMPRESA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL - CETREL, 2005. <http://www.cetrel.com.br>

FLORESTAL ACESITA S.A. **State of the Art Report on Charcoal Production in Brasil**. Minas Gerais, 1982.

FUNGARO, Denise Alves; SILVA, Magali Guilherme da. Utilização de zeólita preparada a partir de cinza residuária de carvão como adsorvedor de metais em água. **Quím. Nova.**, São Paulo, v. 25, n. 6b, 2002. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S010040422002000700007&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010040422002000700007&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em: 04 Mar 2007. Pré-publicação. doi: 10.1590/S0100-40422002000700007.

GOMES, P.A. ; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNÓLOGICO DE MINAS GERAIS. **Manual CETEC: uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, p.10-27. 1982.

HATCH, J.E. **Aluminum: properties and physical metallurgy**. USA: American Society for Metals, 1990.

HILSDORF, Jorge Wilson. **Química Tecnológica**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2005.

[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br).

LECO CORPORATION. **Manual de Instrução da Leco Corporation IR- 212**.

LECO CORPORATION. **Manual de Instrução da SC-132 781-400 SULFUR SYSTEMS**.

MONTEIRO, M. A. **Problemas e perspectivas da verticalização da produção da hematita na Amazônia oriental brasileira: o caso da produção de ferro-gusa**. Belém: NAEA/UFPA, 1998.

MONTEIRO, M. A. **Siderurgia e carvoejamento na Amazônia. Drenagem energético material e pauperização regional**. Belém: NAEA/UFPA, 1998, vol 3.

OLIVEIRA, T. L.; ALMEIDA, M.R. Avaliação de carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Manual CETEC**: uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte, 1980.

PARR INSTRUMENT COMPANY. **Manual de Operação Calorímetro PARR 1261**.