SERGIO LUIS MOSCKEM

ANÁLISE DO EMPREGO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS
NO ALTO FORNO DA ARCELORMITTAL TUBARÃO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Co-orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr.

Guaratinguetá
2010

M896a	<p>Mosckem, Sergio Luis</p> <p>Análise do emprego de materiais alternativos no alto forno da Arcelormittal Tubarão. / Sergio Luis Mosckem – Guaratinguetá : [s.n], 2010.</p> <p>95f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 88-89</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri</p> <p>Co-orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr.</p> <p>1. Termodinâmica 2. Carvão 3. Pneu I. Título</p> <p>CDU 536.7</p>
-------	--

SERGIO LUIS MOSCKEN

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
Orientador / Unesp-Feg

Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
Unesp-Feg

Prof. Dr. RICARDO DIAS MARTINS DE CARVALHO
IEM/UNIFEI

DADOS CURRICULARES

SERGIO LUIS MOSCKEM

NASCIMENTO	21.06.1962 – MARILÂNDIA / ES
FILIAÇÃO	Argentino Mosckem Ermínia Olioza Mosckem
1987/1994	Curso de Graduação Universidade Federal do Espírito Santo
2002	Curso de Especialização em Gestão Empresarial na Fundação Getúlio Vargas.

Dedico, de modo especial, à milha esposa Wânia e as minhas filhas Cristina e Marina, que foram as grandes incentivadoras na realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri*, que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais Argentino e Ermínia, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

à dona *Ieda Maria Siggelkow de Almeida Perrella*, que sempre me acolheu com alegria em sua casa,

aos companheiros de trabalho da ArcelorMittal Tubarão que me auxiliaram na coleta de dados e na correção do trabalho,

ao meu gerente Luiz Antônio Baldon, que sempre apoiou e incentivou a realização deste trabalho,

ao gerente de divisão de operação dos Alto Fornos da ArcelorMittal Tubarão, Jorge Adelino de Faria, que disponibilizou os dados técnicos e operacionais utilizados neste trabalho,

aos engenheiros de operação do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão, Cláudio Cesar da Costa, Ricardo José Tauffer Barros e Mauro Correa da Silva, que forneceram todas as informações e esclarecimentos sobre o processo de produção no Alto Forno,

à ArcelorMittal Tubarão, que acreditou e viabilizou a realização deste trabalho, fornecendo suporte técnico e financeiro em todas as fases do estudo.

MOSCKEM, S. L. **Análise do emprego de materiais alternativos no Alto Forno da ArcelorMittal Tubarão**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

RESUMO

O trabalho de análise do uso de materiais alternativos no Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão estabelece uma taxa de substituição de cada material alternativo, plástico e pneu, em relação ao uso exclusivo do carvão mineral injetado no Alto Forno através das ventaneiras. A taxa de utilização de plástico e pneu é avaliada considerando o aporte de energia e dos agentes necessários para a reação química de redução do minério de ferro em ferro metálico. No presente trabalho são elaborados os balanços de massa e de energia de acordo com a configuração operacional vigente no segundo semestre de 2009 para o Alto Forno 1 e com os dados de produção do mês de julho de 2009. O resultado mostra a viabilidade técnica do uso de plástico ou pneu e estabelece as condições de uso de cada um em relação à quantidade, tipo e granulometria. A substituição energética decorrente do uso de plástico e pneu estabelece uma forma de aplicação segura e controlada deste resíduo, além de agregar valor a estes materiais normalmente descartados pela sociedade. Contribui também para amenizar os impactos ambientais decorrentes da falta de uma destinação regulamentada e eficaz para plásticos descartados e pneus inservíveis.

PALAVRAS-CHAVE: Balanços de energia. Substituição energética. Alto forno. Combustão de materiais alternativos.

MOSCKEM, S. L. **Analysis of alternative fuels materials in the Blast Furnace of ArcelorMittal Tubarão.** 2010. 95 f. Dissertation (Masters in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

ABSTRACT

The study of alternative fuel materials in the Blast Furnace 1 of ArcelorMittal Tubarão, establishes a rate of each material analyzed, waste plastics packaging and waste tires, in order to replace part of the pulverized coal that is usually injected in to the Blast Furnace through the tuyeres. The injection rate of waste plastic packaging and waste tires is analyzed considering the energy input and the necessary elements for the iron ore reduction chemical reaction. The mass and energy balance is done according to the operational configuration of the Blast Furnace 1 in the second semester of 2009 and operation data from July of 2009. The result of the study shows technical viability to use waste plastics packaging and waste tires and establish requirements for the injection, such as flow rate and particles size. The alternative energy provided from these waste materials builds a safety and controlled way to reach the best utilization for each one. Moreover, the environmental impact can be reduced due to its disposal is normally done in outdoor areas.

KEYWORDS: Energy Balance. Alternative Fuels. Blast Furnace. Alternative Materials Combustion.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Fluxo de preparação do carvão pulverizado	18
FIGURA 2 – Injeção de carvão pulverizado através das ventaneiras	18
FIGURA 3 – Fluxo gasoso ascendente no interior do Alto Forno	19
FIGURA 4 – Perfil térmico das regiões internas do Alto Forno	20
FIGURA 5 – Perfil das reações químicas no interior do Alto Forno	20
FIGURA 6 – Fluxo do processo de produção do aço	21
FIGURA 7 – Zonas internas do Alto Forno	25
FIGURA 8 – Perfil das reações químicas no interior do Alto Forno	27
FIGURA 9 – Instalação típica para preparação do resíduo de plástico para injeção no Alto Forno	31
FIGURA 10 – Método de análise flutuação da chama	32
FIGURA 11 – Imagens da combustão de plástico e carvão nas ventaneiras	33
FIGURA 12 – Efeito da injeção na flutuação de chama	34
FIGURA 13 – Região do fluxo de gases em função do tamanho da partícula	34
FIGURA 14 – Composição de um pneu	40
FIGURA 15 – Esquema para injeção de pneu através das ventaneiras	42
FIGURA 16 – Produção anual de pneus no Brasil	43
FIGURA 17 – Ciclo de vida de um pneu	44
FIGURA 18 – Cadeia de pneus inservíveis	45
FIGURA 19 – Produção e destino de pneus no Brasil	46
FIGURA 20 – Fluxo de produção da ArcelorMittal Tubarão	47
FIGURA 21 – Alto Forno 1 e a área de produção de gusa da ArcelorMittal Tubarão	48
FIGURA 22 – Perfil do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão	52
FIGURA 23 – Arranjo esquemático da configuração do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão	53

FIGURA 24 – Fluxograma de carregamento do Alto Forno 1.....	54
FIGURA 25 – Fluxograma de preparação do carvão pulverizado.....	55
FIGURA 26 – Desenho em corte de uma ventaneira de Alto Forno	55
FIGURA 27 – Ventaneira do Alto Forno 1 mostrando as lanças de injeção de carvão pulverizado	56
FIGURA 28 – Ilustração da composição dos regeneradores no Alto Forno	57
FIGURA 29 – Balanço de massa: Entradas e saídas.....	58
FIGURA 30 – Volume de controle aplicado sobre o Alto Forno 1	60
FIGURA 31 – Gráfico do balanço de vazão em massa.....	63
FIGURA 32 – Gráfico da relação da massa de entrada / saída	64
FIGURA 33 – Gráfico do balanço de energia do Alto Forno 1	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Características dos materiais para injeção	17
TABELA 2 – Composição média do gás de Alto Forno da ArcelorMittal Tubarão.	26
TABELA 3 – Taxa de redução pelo Hidrogênio no total da Redução Indireta	35
TABELA 4 – Produção e reciclagem de plástico no Brasil	36
TABELA 5 – Distribuição regional da produção de plástico pós-uso no Brasil	38
TABELA 6 – Distribuição regional da reciclagem de plástico pós-uso no Brasil...	38
TABELA 7 – Preço de plástico para reciclagem.....	39
TABELA 8 – Composição química do pneu.....	41
TABELA 9 – Composição do pneu por tipo	41
TABELA 10 – Taxa de injeção x índice de combustão do pneu	42
TABELA 11 – Taxa de injeção x índice de combustão do carvão	42
TABELA 12 – Peso de Pneu inservível	46
TABELA 13 – Dados e relação de entrada e saída de vazão em massa	62
TABELA 14 – Composição de carvões e a análise química resultante	65
TABELA 15 – Composição de carvões e plástico com a análise química resultante.....	66
TABELA 16 – Composição de carvões e pneu com a análise química resultante ..	67
TABELA 17 – Energia de entrada do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão	75
TABELA 18 – Energia de saída do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão	78
TABELA 19 – Balanço de energia do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão.....	79
TABELA 20 – Estimativa de consumo de carvão + plástico	81
TABELA 21 – Estimativa de consumo de carvão + pneu	84

LISTA DE SÍMBOLOS

c	calor específico	<i>kcal/kgK</i>
g	aceleração da gravidade	<i>m/s²</i>
H, h	entalpia específica	<i>kcal/kg</i>
p	pressão	<i>kgf/cm²</i>
Q	calor	<i>kcal</i>
t	tempo	<i>s</i>
T	temperatura	<i>°C</i>
m	massa	<i>kg</i>
v	velocidade	<i>m/s</i>
Z	Cota	<i>m</i>
VS	vazão de sopro	<i>Nm³/t de gusa</i>
CR	taxa de carregamento de coque	<i>kg/t de gusa</i>
IV	Injeção de vapor	<i>g/ Nm³</i>
TS	temperatura de sopro	<i>°C</i>
C _p (VS)	calor específico do ar	<i>kcal/Nm³</i>
EO ₂	enriquecimento com oxigênio	<i>%</i>
N ₂ (VS)	nitrogênio na vazão de sopro	<i>%</i>
N ₂ (Topo)	nitrogênio no gás do topo -BFG	<i>%</i>
CO(Topo)	monóxido de carbono no gás do topo – BFG	<i>%</i>
CO ₂ (Topo)	dióxido de carbono no gás do topo – BFG	<i>%</i>
H ₂ (Topo)	hidrogênio no gás do topo – BFG	<i>%</i>
SR	taxa de Produção de escória	<i>kg/t de gusa</i>
C	carbono presente no gusa	<i>%</i>
Si	silício presente no gusa	<i>%</i>
Mn	manganês presente no gusa	<i>%</i>
P	fósforo presente no gusa	<i>%</i>
T _{gusa}	temperatura do gusa	<i>°C</i>
T _{gás BFG}	temperatura do gás do topo	<i>°C</i>
H _{i1}	calor de combustão do carbono	<i>kcal/t de gusa</i>
H _{i2}	calor sensível do ar de sopro	<i>kcal/t de gusa</i>
H _{i3}	calor da redução indireta	<i>kcal/t de gusa</i>
H _{i4}	calor de formação da escória	<i>kcal/t de gusa</i>
H _{o1}	calor da reação <i>solution loss</i>	<i>kcal/t de gusa</i>
H _{o2}	calor da redução do hidrogênio	<i>kcal/t de gusa</i>
H _{o3}	calor sensível do gás BFG	<i>kcal/t de gusa</i>
H _{o4}	calor sensível do ferro gusa e da escória	<i>kcal/t de gusa</i>
H _{o5}	calor de redução pelo carbono do silício, manganês e fósforo	<i>kcal/t de gusa</i>
H _{o6}	calor de decomposição do vapor – presente no ar de sopro	<i>kcal/t de gusa</i>
H _{o7}	calor de evaporação da água – do coque, minério	<i>kcal/t de gusa</i>

H_{I1}	calor removido pelo sistema de resfriamento – carcaça, ventaneiras e cadinho	<i>kcal/t de gusa</i>
H_{I2}	calor removido por radiação da carcaça	<i>kcal/t de gusa</i>
H_{I3}	calor cedido pelo ar soprado no anel de vento	<i>kcal/t de gusa</i>
H_{I4}	variação da entalpia no interior do cadinho do alto Forno	<i>kcal/t de gusa</i>

Subscritos

e ou i	entrada
s ou o	saída
l	perda
VC	volume de controle

LISTA DE SIGLAS

PCI	pulverized coal injection
PET	polietileno tereftalato
PEAD	polietileno de alta densidade
PVC	policloreto de vinila
PEBD	polietileno de baixa densidade
PELBD	polietileno linear de baixa densidade
PP	polipropileno
PS	poliestireno

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	24
2.1 Alto Forno.....	24
2.1.1 Zona granular.....	26
2.1.2 Zona de amolecimento e fusão	28
2.1.3 Zona de gotejamento	28
2.1.4 Zona de coque ativo.....	29
2.1.5 Zona do homem morto	29
2.2 Utilização de plástico	29
2.2.1 Reações químicas	29
2.2.2 Tipo de plástico injetado	30
2.2.3 Método de preparação	31
2.2.4 Instalação para preparação e processamento do resíduo	32
2.2.5 Resultados experimentais da injeção de plástico	32
2.2.6 Comportamento da combustão simultânea do carvão quando injetado com plástico.....	35
2.2.7 Comportamento do alto forno com a injeção de plástico	35
2.2.8 Produção de resíduo de plástico no Brasil.....	36
2.2.9 Distribuição da produção e reciclagem de plásticos por região no Brasil	38
2.2.10 Preço de resíduo de plástico no Brasil.....	39
2.3 Utilização de pneu descartado	39
2.3.1 Produção de pneus novos no Brasil.....	43
2.3.2 Cadeia de pneus inservíveis.....	44
2.3.3 Produção e destino de pneus no Brasil	45
2.3.4 Custo de co-processamento de pneu.....	46
3 METODOLOGIA E APLICAÇÃO.....	47
3.1 Características técnicas do Alto Forno 1	49
3.1.1 Alto Forno próprio.....	49
3.1.2 Regeneradores	49
3.1.3 Limpeza de gás	49
3.1.4 Equipamentos de carregamento.....	50
3.1.5 Pressão de topo	50
3.1.6 Casa de corrida	50
3.1.7 Sistema de injeção de carvão pulverizado.....	51
3.1.7.1 Sistema de moagem.....	51
3.1.7.2 Sistema de injeção	51
3.1.8 Turbina de topo.....	51
3.1.9 Dimensões do Alto Forno.....	51
3.2 Configuração do Alto Forno 1	53

3.2.1 Unidade de carregamento	53
3.2.2 PCI – <i>Pulverized Coal Injection</i> – Injeção de carvão pulverizado	54
3.2.3 Regeneradores	56
3.3 Matérias primas e insumos	57
3.4 Balanço de massa	59
3.4.1 Equacionamento do balanço de massa	59
3.4.2 Relação entre a vazão em massa de entrada e de saída	63
3.4.3 Parâmetro de correlação entre a massa de entrada e saída	64
3.5 Balanço de energia	68
3.5.1 Equacionamento do balanço de energia	69
3.5.2 Obtenção do balanço de energia.....	72
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	81
4.1 Características do plástico a ser injetado.....	82
4.2 Custo do plástico a ser injetado	82
4.3 Estimativa da taxa de injeção de pneu.....	83
4.4 Características do pneu a ser injetado	83
4.5 Custo do pneu a ser injetado.....	83
4.6 Avaliação de resultados	85
5 CONCLUSÕES	86
REFERÊNCIAS	88
ANEXOS.....	90

1 INTRODUÇÃO

Usinas siderúrgicas integradas são aquelas que possuem todo o ciclo de produção de aço, compreendendo a redução, o refino e a laminação. Produz o aço através do ferro gusa líquido obtido em Alto Forno a partir do minério de ferro com uso de coque ou carvão vegetal como agente redutor. A transformação do ferro gusa em aço (refino) é feita através de fornos a oxigênio.

Usinas siderúrgicas são indústrias de transformação com grande demanda de energia e insumos ao longo de toda a cadeia produtiva, compreendendo desde a matéria prima até o produto acabado final. Em tais unidades de processo, o carvão mineral é responsável pela energia, entregue na forma de coque e de carvão pulverizado, que viabiliza a transformação do minério de ferro em ferro gusa nos Altos Fornos. Além disso, o carvão mineral fornece aos processos de produção que demandam energia térmica um produto combustível, o gás de coque – COG (*Coke Oven Gas*), que é resultante do processo de coqueificação do carvão nas Coquerias, processo de obtenção do coque.

O uso intensivo de energia no processo siderúrgico vem impondo ao longo do tempo grandes desafios, buscando seu uso racional ou viabilizando novas fontes alternativas de energia, renováveis ou não. A otimização e uso racional do carvão mineral já é uma prática no cenário mundial, caracterizada pela busca contínua em diminuir a dependência exclusiva do carvão mineral. Fontes alternativas de energia, especialmente aquelas provenientes de fontes renováveis, estão sendo investigadas. Fontes provenientes de resíduos gerados pela sociedade ou processos industriais têm presença de destaque nas pesquisas em desenvolvimento. A linha de ação buscada nas pesquisas que tratam deste tema visa prover este tipo de indústria de um material alternativo capaz de realizar o processo como substituto do carvão, reduzir o custo de produção, contribuir e aliar-se na luta pela preservação do planeta.

O carvão mineral pulverizado que é atualmente injetado em Altos Fornos possui, na média, as características descritas na Tabela 1, de forma comparativa com outros materiais com emprego potencial como fonte energética alternativa.

Tabela 1 – Características dos materiais para injeção

Material	Composição %							Poder Calorífico kcal/kg (kJ/kg)
	C	H	S	Cl	K	Na	Cinzas	
Carvão	79,6	4,32	0,97	0,20	0,2656	0,0816	9,03	7.760 (1.855)
Plástico	77,81	11,99	0,90	1,40	0,0480	0,0920	4,90	10.382 (2.481)
Pneu	83,00	7,00	0,30	-----	-----	-----	6,00	7.667 (1.832)

Fonte: Lund (1993).

O carvão mineral é injetado no Alto Forno na forma de carvão pulverizado, fornecendo energia e agentes redutores para a transformação do minério de ferro em ferro metálico – ferro gusa. Participa de forma conjunta com o coque no processo de redução do minério de ferro. A utilização do carvão pulverizado visa reduzir custos e aumentar a produtividade do Alto Forno.

O carvão utilizado para injeção é normalmente carvão de baixo custo e que não é adequado para a produção de coque – não coqueificável. Normalmente utiliza-se o antracito.

O antracito é um carvão não coqueificável devido a seu baixo teor de matéria volátil, cerca de 5% de MV (matéria volátil). Os carvões coqueificáveis estão classificados com teor de matéria volátil entre 22 e 35% de MV; o médio volátil possui cerca de 22 % de MV e o alto volátil cerca de 35 de MV. (ASSIS, 1993).

O fluxo do processo de preparação do carvão pulverizado é mostrado na Figura 1.

Fonte: ArcelorMittal Tubarão

Figura 1- Fluxo de preparação do carvão pulverizado

Após o processo de preparação, o carvão pulverizado é injetado de forma contínua no Alto Forno através de um fluxo gasoso de nitrogênio, que através de lanças instaladas nas ventaneiras do Alto Forno promovem a injeção do carvão pulverizado diretamente na zona de combustão do Alto Forno, conforme mostra a Figura 2.

Fonte: OGAKI et al, 2001.

Figura 2 - Injeção de carvão pulverizado através das ventaneiras

O carvão pulverizado, ao ser injetado na região de combustão do Alto Forno, reage com o oxigênio do sopro, formando dióxido de carbono: $C + O_2 = CO_2$. À medida que o fluxo gasoso segue seu fluxo ascendente, conforme mostra a Figura 3, o dióxido de carbono reage com o

carbono do coque formando o monóxido de carbono: $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$. Das reações acima resulta a reação: $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$.

Como o ar soprado contém umidade, na presença do carbono do carvão, ocorre a seguinte reação: $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$. Nesta etapa, o monóxido de carbono reage com o minério de ferro gerando o ferro metálico: $3\text{CO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$. O processo ocorre de forma contínua, sendo que as reações ocorrem à medida que o fluxo gasoso permeia toda a carga no interior do Alto forno e as regiões são estabelecidas em função da etapa em que o processo ocorre, bem como suas reações químicas e térmicas.

O perfil destas regiões térmicas está mostrado na Figura 4 e o perfil das regiões com as reações químicas está mostrado na Figura 5. Todo este processo resulta na obtenção de gusa líquido, escória líquida e gás de Alto Forno. O ferro gusa obtido neste processo é a matéria prima para a obtenção do aço, numa cadeia de processo conforme ilustra a Figura 6. Este é o contexto de um Alto Forno no complexo de uma usina siderúrgica integrada.

Fonte: www.ufpa.br/getsolda/docs_posGrad/IEMAulaAco.ppt

Acesso em 02/03/2009

Figura 3 – Fluxo gasoso ascendente no interior do Alto Forno

Fonte: www.ufpa.br/getsolda/docs_posGrad/IEMAulaAco.ppt

Acesso em 02/03/2009

Figura 6 – Fluxo do processo de produção do aço

Os materiais alternativos a serem injetados nas ventaneiras devem ser capazes de fornecer condição de reação química equivalente à mostrada para o carvão mineral, ou seja, ser boa fonte de carbono. Outra característica importante é a de promover aporte térmico equivalente e viável do ponto de vista econômico e financeiro. A concepção proposta para o presente trabalho será, portanto, de procurar aliar a oportunidade do uso de cada material e o conseqüente impacto decorrente de seu uso.

Dentro deste contexto, apresentam-se algumas informações acerca da empresa que será objeto de investigação; a ArcelorMittal Tubarão é uma usina integrada a carvão mineral, ou seja, sua matriz energética é fundamentada na utilização do carvão mineral, localizada em Jardim Limoeiro – Serra – Espírito Santo – Brasil. Esta empresa pertence ao grupo ArcelorMittal e produz aços planos na forma de bobinas a quente e placas semi-acabadas. Sua capacidade nominal de produção é de 7,5 Mt/a.

A ArcelorMittal Tubarão possui três Altos Fornos, sendo que o presente trabalho deverá considerar em seu desenvolvimento apenas análises referentes ao Alto Forno 1. O Alto Forno 1

foi construído na fase de implantação da usina, tendo iniciado sua produção (*blow in*) em 1983 e desde então opera de forma ininterrupta – ou seja, sem reforma.

A carga do Alto Forno 1 é composta de sinter, pelota, minério de ferro, coque, fundentes e carvão pulverizado. A capacidade nominal de produção do Alto Forno 1 é de 10.000 t /dia de gusa líquido. As ventaneiras estão distribuídas uniformemente ao longo do perímetro do Alto Forno localizado na região do anel de vento; no caso do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão, são 38 ventaneiras, cuja função principal é fornecer ar quente ao Alto Forno, suprimindo assim a demanda de oxigênio para a reação química de redução do minério de ferro.

Este trabalho analisa a utilização de resíduos industriais, municipais ou agrícolas como fonte energética para Alto Forno siderúrgico. Será analisada a aplicação de resíduos de plástico e pneus usados e inservíveis. A viabilização do uso destes materiais alternativos promoveria a preservação de um recurso natural - o carvão mineral - ao mesmo tempo em que dá destinação nobre e adequada aos resíduos que, na falta desta alternativa, são com frequência depositados nos lixões das cidades ou armazenados a céu aberto e sem controle.

A análise do emprego de materiais alternativos no Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão pretende estabelecer uma taxa de substituição de cada material analisado, plástico, pneu e madeira em relação ao carvão mineral pulverizado. A taxa de utilização do plástico e pneu será avaliada considerando o aporte de energia e de agentes da reação química necessários para a redução do minério de ferro em ferro metálico. A participação de cada material será avaliada de forma a contribuir como uma parcela na redução da utilização do carvão mineral e não de sua substituição.

Serão preservadas as devidas restrições técnicas e econômicas que cada material vier a requerer. A linha de ação buscada neste trabalho é de contribuir fornecendo base para futuras decisões de aplicação em escalas piloto ou de produção de acordo com a viabilidade de cada planta. Serão avaliadas questões como um todo envolvendo o uso destes materiais, como viabilidade técnica, disponibilidade de cada material e custos.

Os objetivos do presente trabalho estão baseados em:

- a) Identificar a viabilidade técnica de uso de cada material (requisito de cada material, forma de utilização, comportamento nas reações químicas, avaliação do balanço de massa e de energia);
- b) Estabelecer a taxa de injeção de cada material;
- c) Avaliar o impacto no processo de produção de ferro gusa, com a entrada de novo material na matriz de matéria prima, incluindo a avaliação da confiabilidade de seu fornecimento (fontes, demandas, consumo, aplicação, qualidade, custos);
- d) Avaliar custos e benefícios da utilização destes materiais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Alto Forno

O Alto Forno é um reator químico vertical onde as reações de transformação do minério de ferro ocorrem em contra-corrente com carga metálica descendente, que é carregada no topo com os gases ascendentes que são gerados na região das ventaneiras. Estes gases são gerados na zona de combustão através da injeção de ar quente e combustíveis. A função do Alto Forno é de produzir ferro metálico na fase líquida a partir do minério de ferro *in natura*.

O ferro metálico, também conhecido como ferro gusa ou simplesmente gusa, possui composição química que varia em função da composição de cada material carregado bem como de suas percentagens na composição da carga. O gusa possui a seguinte composição química média, segundo referência tomada da ArcelorMittal Tubarão, análise média de julho de 2009:

Ferro = 94 %

Carbono = 4,9 %

Silício = 0,3 %

Manganês = 0,45 %

Fósforo = 0,077 %

Enxofre = 0,023 %

O corpo do Alto forno é dividido em regiões basicamente em função da cinética das reações químicas e das temperaturas envolvidas. O Alto Forno e suas zonas internas são mostrados na Figura 7. Na região de combustão onde estão localizadas as ventaneiras, a temperatura em geral é superior a 2.000 °C . Na base inferior do Alto Forno, na região do cadinho a temperatura está em torno de 1500 °C . Este gradiente torna-se mais acentuado nas regiões próximas ao topo, e no ponto próximo ao carregamento da matéria prima, a temperatura está em torno de 200 °C. As regiões do Alto Forno são conhecidas e distribuídas conforme mostra a Figura 7.

Fonte: Noblat (2006) apud Silva (2006)¹

Figura 7 – Zonas internas do Alto Forno

A carga do Alto Forno é formada por coque, que é fonte de energia e carbono; sínter, coque, pelota, minério bitolado, que é fonte de ferro; fundentes (calcário, dolomita), que são fontes de elementos para a correção da viscosidade, volume e temperatura da escória. Tais materiais são carregados em camadas sucessivas e alternadas através do equipamento de carregamento e distribuição de carga no topo do Alto Forno. A partir da matéria prima carregada, os seguintes produtos são gerados:

- Gusa líquido: extraído através dos furos de gusa que estão localizados na região do cadinho conforme mostra a Figura 7; é um produto com densidade de 7.800 kg/m^3 .
- Escória: extraída através dos canais de escória provenientes também dos furos de gusa conforme mostra a Figura 7. A escória é separada do gusa líquido por diferença de densidade; sua densidade é de 2.500 kg/m^3 ;

O gusa segue para o carregamento do carro torpedo e a escória para o granulador de escória.

¹ NOBLAT, J.X. Curso de alto forno. Apud: SILVA, A.M. **Estudo da Combustão dos Carvões e Misturas com Coque Verde de Petróleo Injetadas em Altos Fornos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2006.

Além destes dois produtos, é importante destacar a Produção do gás de Alto Forno, que é um gás combustível pobre, extraído no topo e conduzido para o sistema de limpeza de gases e posteriormente à distribuição interna na usina para uso como combustível. Sua composição média de referência é apresentada na Tabela 2, de acordo com valores obtidos em ArcelorMittal Tubarão (Julho de 2009).

Tabela 2 – Composição média do gás de Alto Forno da ArcelorMittal Tubarão

N ₂	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄
49,04 %	22,17 %	22,86 %	4,11 %	1,98 %
Poder calorífico inferior médio = 796 kcal/ Nm ³ (191 kJ/Nm ³)				
Temperatura média = 123°C.				

2.1.1 – Zona Granular

É a região mais elevada do Alto Forno. Nela, os materiais carregados através do topo ainda estão no seu estado sólido. É a região definida entre a última camada de material carregada até a região onde ocorre o início do amolecimento da carga metálica. Nesta região, a temperatura varia entre 120°C na região de carregamento e 1100° C no início de amolecimento.

Ao serem carregados, os materiais estão próximos da temperatura ambiente em torno de 30°C e, à medida que entram em contato com o ambiente de temperatura em elevação, iniciam-se as transformações e reações segundo Noblat (2006) apud Silva.

A dinâmica das reações é apresentada na Figura 8.

Fonte: Silva (2006)

Figura 8 – Perfil das reações químicas no interior do Alto Forno

a) Evaporação da água contida na carga metálica, coque e fundentes, devido aos gases oriundos da região inferior do forno conforme equação de vaporização

b) Calcinação dos fundentes (calcário e dolomita) por ação da temperatura dos gases. A calcinação ocorre pela perda de CO_2 através do aquecimento na reação expressa a seguir.

c) Redução dos óxidos metálicos presentes no sinter, pelota, minério bitolado através da ação do monóxido de carbono (CO). Nesta região ocorre uma reação de redução indireta; tal reação ocorre pela ação do CO ascendente em contracorrente com a carga metálica descendente, conforme reações em cadeia descritas na sequência.

Quando o óxido de ferro é reduzido pelo monóxido de carbono, diz-se que ocorre a reação indireta pela reação descrita em (1).

Quando o óxido de ferro é reduzido pelo carbono, denominamos que ocorre a reação direta pela reação descrita em (2).

2.1.2 – Zona de Amolecimento e Fusão

É a região localizada abaixo da região granular, compreende o início de amolecimento até o final da fusão da carga metálica. Nesta fase os materiais metálicos se apresentam no estado pastoso.

2.1.3 – Zona de Gotejamento

É a região entre a zona de amolecimento e fusão e a região das ventaneiras. Nesta região ocorrem os seguintes fenômenos (SILVA, 2006):

- Os materiais já fundidos gotejam para o cadinho;
- Ocorrem as reações de incorporação dos elementos não ferríticos: silício, manganês, fósforo, carbono e enxofre no ferro gusa;
- Ocorre a maior parte da dessulfuração do ferro gusa;
- O coque no estado sólido é parcialmente consumido pelo dióxido de carbono na reação “*solution loss* ou *bourduard*”; ($\text{C}_{(\text{s})} + \text{CO}_{2(\text{g})} = 2 \text{CO}_{(\text{g})}$).

2.1.4 – Zona de Coque Ativo

É a região localizada dentro da zona de gotejamento. Esta é a região onde ocorre a reação do monóxido de carbono – CO com o carbono presente no coque incandescente.

2.1.5 – Zona do Homem Morto

É a região abaixo da zona de coque ativo. Esta é a região onde o coque incandescente está misturado com o ferro gusa líquido e a escória. Este composto possui a característica de alta densidade e baixa fluidez. O volume de material nesta região varia em função da reserva térmica do Alto Forno: se for grande, há acúmulo de coque e esta região cresce; se for pequena o coque é consumido e a região decresce.

2.2 – UTILIZAÇÃO DE PLÁSTICO

2.2.1- Reações Químicas

A reciclagem de plásticos proveniente de embalagens descartadas para uso em Alto Forno foi pesquisada por Ogaki et al. (2001), através da injeção nas ventaneiras do Alto Forno número 1 da empresa japonesa NKK cuja produção de gusa é de 10.000 t/dia. O trabalho desenvolvido estabeleceu a injeção de plástico através das ventaneiras, porém manteve a injeção de carvão pulverizado. Neste caso, o plástico promoveu uma taxa de injeção de substituição do carvão.

O carvão e o plástico são completamente gaseificados na região das ventaneiras. As reações químicas com esta injeção de carvão com plástico são:

- $C + O_2 = CO_2$, reação decorrente do oxigênio com o carvão pulverizado e parte do coque incandescente na região de combustão.
- $C + CO_2 = 2 CO$, reação decorrente da ação do dióxido de carbono no coque.
- $\frac{1}{2} C_2H_4 + CO_2 = 2 CO + H_2$, reação decorrente do plástico, neste caso o polietileno.

O CO e o H₂ gerados permeiam de forma ascendente toda a carga do forno e ocorrem as reações com o minério de ferro, resultando na formação do ferro metálico. No caso de somente carvão pulverizado e coque, obtém-se a reação descrita em (3)

No caso de plástico, ocorre a reação descrita em (4).

Com o uso do plástico, fornecendo a participação do hidrogênio na reação de redução do minério de ferro, a quantidade de CO₂ gerado foi reduzida em 1/3 em comparação com o uso somente do carvão pulverizado e coque.

2.2.2- Tipo de plástico injetado

Conforme Ogaki *et al.* (2001), deve ser minimizada a participação do uso de plásticos que contêm PVC devido a formação do ácido clorídrico (HCl), que pode tornar corrosivo o gás gerado no Alto Forno, o BFG (*Blast Furnace Gas*), e pode ocorrer a corrosão ácida na instalação de tratamento do gás, bem como em tubulações e queimadores nas plantas onde o gás é queimado como combustível. Não houve a comprovação da presença de dioxinas e furanos no gás de Alto Forno - BFG. Em relação à forma do resíduo de plástico, podem ser utilizados:

- Resíduos sólidos: bombonas, garrafas, potes, caixas, resíduos de fabricação de embalagens, peças e componentes plásticos, embalagens e vasilhames em geral.
- Resíduos em filmes: sacolas, folhas e lâminas de embalagens em geral.

Cada tipo de resíduo tem uma preparação e processamento particular para viabilizar sua injeção no Alto Forno.

2.2.3- Método de preparação

Para os resíduos em filmes, após a separação do resíduo sólido são aquecidos e transformados em pelotas, ou seja, são pelletizados; para os resíduos sólidos, após a separação do resíduo em filmes, são moídos/triturados. A Figura 9 ilustra tal procedimento. As duas formas de processamento são distintas e podem operar simultaneamente ou de forma independente conforme disponibilidade de matéria prima ou das linhas de processamento.

Fonte: Ogaki *et al.* (2001)

Figura 9- Instalação típica para preparação do resíduo de plástico para injeção no Alto Forno.

Tanto os resíduos sólidos quanto os resíduos em filmes são originados de descarte nas indústrias de fabricação e beneficiamento de produtos plásticos, bem como da Produção de resíduos no comércio e na comunidade municipal em geral. Não há restrição quanto ao estado físico, apresentação ou limpeza do resíduo, isto é, todo resíduo é adequado para este uso. Resíduos de alimentos ou material particulado são toleráveis.

2.2.4- Instalação para preparação e processamento do resíduo

É necessária a instalação de uma unidade de processamento que atenda aos requisitos de preparação e processamento do resíduo de plástico conforme mostra a Figura 9. O dimensionamento da instalação será com base na capacidade de processamento estabelecida bem como da forma de recebimento da matéria prima *in natura*. A forma sugerida é de receber os resíduos na forma compactada, embalados e prensados em volumes de aproximadamente 1,0 m³ para facilitar o manuseio, transporte e a armazenagem.

2.2.5- Resultados experimentais da injeção de plástico

Conforme Asanuma *et al.* (2000), foi realizado o teste de injeção de plástico no Alto Forno 1 da empresa japonesa NKK. A injeção experimental foi realizada em 5 das 40 ventaneiras. Neste teste foi injetado:

- Plástico triturado = tamanho de partícula de 0,2 a 1,0 mm e 10,0 mm
- Plástico aglomerado = tamanho de partícula de 10,0 mm

A investigação da queima do plástico em comparação com o carvão pulverizado foi realizada através da captura de imagens através das ventaneiras e com câmera de alta velocidade/resolução. Analisando as imagens pode ser verificada a combustibilidade – grau de facilidade de realizar a combustão - de cada material tomando-se como referência as áreas de domínio da chama, conforme Figura 10. A relação de áreas A/B indica que, quanto maior for esta relação, maior é a combustibilidade do material.

Fonte: Asanuma *et al.* (2000)

Figura 10 – Método de análise da flutuação da chama

Com base em tal conceito, o resultado das imagens capturadas através das ventaneiras para os diferentes tipos de fontes de energia é apresentado na Figura 11. Comparativamente para plásticos com 10 mm (triturado), plásticos com 10 mm (aglomerado), plásticos com 0,2 a 1,0 mm (triturado), em relação ao carvão pulverizado, o plástico com partícula de 0,2 a 1,0 mm possui a combustibilidade menor que o carvão pulverizado; porém, é o que mais se aproxima deste, conforme Figura 12.

Fonte: Asanuma *et al.* (2000)

Figura 11 – Imagens da combustão de plástico e carvão nas ventaneiras

Fonte: Asanuma et al. (2000)

Figura 12 – Efeito da injeção na flutuação de chama

Os resultados obtidos no teste sugerem que a região de combustão e gaseificação do plástico varia em função do tamanho da partícula, influenciando assim a região afetada pelo fluxo dos gases, conforme ilustra a Figura 13.

Fonte: Asanuma *et al.* (2000)

Figura 13 – Região do fluxo de gases em função do tamanho da partícula

2.2.6- Comportamento da combustão simultânea do carvão quando injetado com plástico

Conforme conclui Gupta *et al.* (2006), em teste realizado utilizando uma mistura composta por carvão e plástico, a eficiência de combustão indicou ser similar àquela somente com uso de carvão embora parte do plástico não tenha sido completamente queimado. O estudo mostra que até 30% de plástico podem ser adicionados à mistura de carvão sem afetar a eficiência de combustão.

2.2.7- Comportamento do Alto Forno com a injeção do plástico

A injeção de plástico no Alto Forno adiciona carbono e hidrogênio às reações que ocorrem no interior do Alto Forno. Shu *et al.* (2004) mostra em seu estudo o comportamento e os efeitos do hidrogênio proveniente do plástico em teste realizado num Alto Forno de 11,2 m de diâmetro, 25,2 m de altura, volume de 2.303 m³ e produção de 4.500 t de gusa/dia. A taxa de injeção de plástico é de 2,0 kg/s ou equivalente a 38,4 kg/t de gusa.

O resultado obtido em tal estudo demonstrou que através da injeção de plástico houve um aumento na taxa de redução indireta devido a presença do hidrogênio no plástico, quando comparado ao caso *All Coke* - uso exclusivo de coque - como mostra a Tabela 3, melhorando assim o desempenho do Alto Forno.

Tabela 3 - Taxa de redução pelo hidrogênio no total da redução indireta

Caso	Taxa de Redução pelo Hidrogênio (%)		
	$\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_3\text{O}_4$	$\text{Fe}_3\text{O}_4 > \text{FeO}$	$\text{FeO} > \text{Fe}$
<i>All Coke</i>	0,4	11,2	28,6
Injeção de vapor	2,5	34,9	53,5
Injeção de Gás Natural	10,9	79,8	74,4
Injeção de Plástico	1,2	27,0	49,3

Fonte: Shu *et al.* (2004)

Com isso a operação do Alto Forno obteve os seguintes resultados (Shu et al., 2004): um aumento de produção de 7,7 % e uma redução na taxa de consumo de coque (coke rate) de 13,4 %. O desempenho do Alto Forno melhorou em função da redução do *coke rate*, que é

decorrente da diminuição da demanda térmica para a redução direta. A condição da zona de combustão para o caso analisado revelou queda de temperatura de 2098°C para 2018°C, com aumento da Produção de gás de 90,0 Nm³/s para 93,1 Nm³/s quando comparando o caso *All Coke* com o de injeção de plástico.

2.2.8 - Produção de resíduo de plástico no Brasil

A produção de resíduos plásticos no Brasil em 2006 está configurada conforme a Tabela 4, que apresenta a produção e a reciclagem de cada tipo de plástico classificado de acordo com a sua resina. Com base nos valores apresentados, fica evidente que há um saldo disponível para futuros reaproveitamento ou reciclagem para todos os tipos de resinas.

Tabela 4- Produção e reciclagem de plástico no Brasil

Resina	Produção (t/ano)	Reciclado (t/ano)	Descartado (t/ano)
PET	454.925	261.912	193.013
PEAD	335.387	94.181	241.206
PVC	103.266	14.149	89.117
PEBD/PELBD	788.713	185.976	602.737
PP	381.062	141.210	239.852
PS	133.441	37.725	95.716
OUTROS TIPOS	55.896	17.103	38.793
TOTAL	2.299.159	767.503	1.531.656

Fonte: Plastivida – Instituto Sócio Ambiental dos Plásticos (2006).

Os principais elementos que compõem os produtos descritos na Tabela 4 são (Ambientebrasil, 2009):

PET - Polietileno tereftalato: frascos e garrafas para uso alimentício/hospitalar, cosméticos, bandejas para microondas, filmes para áudio e vídeo, fibras têxteis;

PEAD - Polietileno de alta densidade: embalagens para detergentes e óleos automotivos, sacolas de supermercados, garrafeiras, tampas, tambores para tintas, potes, utilidades domésticas;

PVC – Policloreto de vinila: embalagens para água mineral, óleos comestíveis, maioneses, sucos. Perfis para janelas, tubulações de água e esgotos, mangueiras, embalagens para remédios, brinquedos, bolsas de sangue, material hospitalar;

PEBD – Polietileno de baixa densidade e PELBD - Polietileno linear de baixa densidade: sacolas para supermercados e lojas, filmes para embalar leite e outros alimentos, sacaria industrial, filmes para fraldas descartáveis, bolsa para soro medicinal, sacos de lixo;

PP – Polipropileno: filmes para embalagens e alimentos, embalagens industriais, cordas, tubos para água quente, fios e cabos, frascos, caixas de bebidas, autopeças, fibras para tapetes e utilidades domésticas, potes, fraldas e seringas descartáveis;

PS – Poliestireno: potes para iogurtes, sorvetes, doces, frascos, bandejas de supermercados, geladeiras (parte interna da porta), pratos, tampas, aparelhos de barbear descartáveis, brinquedos;

Para efeito da utilização de plásticos no Alto Forno 1, no presente trabalho está sendo excluída a resina PVC, como anteriormente citado em Ogaki et al (2001), devido à possibilidade de Produção de corrosão ácida nas instalações de lavagem de gases do Alto Forno, bem como em tubulações e queimadores das caldeiras que utilizam este gás como combustível na ArcelorMittal Tubarão. Observa-se uma grande fonte potencial de matéria prima, suficiente para suprir a demanda da injeção de plástico no Alto Forno da ArcelorMittal Tubarão, que neste momento é estimada como sendo quantificada na seguinte proporção:

- Injeção de plástico conforme Shu et al. (2004) = 38,4 kg/ t de gusa.
- Produção de gusa do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão = 10.000 t gusa / dia
- Quantidade máxima estimada de plástico injetado = 38,4 kg / t gusa x 10.000 t gusa / dia
= 384.000 kg / dia.

2.2.9 – Distribuição da Produção e reciclagem de plásticos por região no Brasil

A produção de resíduo plástico pós-uso no Brasil está distribuída conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5- Distribuição regional da Produção de plástico pós-uso no Brasil

Tipo de resíduo plástico	Centro - Oeste	Norte	Nordeste	Sul	Sudeste	Brasil
PET	24.979	22.903	84.953	59.747	187.816	380.398
PEAD	24.714	22.660	84.053	59.113	185.824	376.364
PVC	6.772	6.209	23.030	16.197	50.916	103.124
PEBD/PELBD	39.851	36.539	135.534	95.320	299.641	606.885
PP	32.935	30.197	112.012	78.777	247.637	501.558
PS	8.807	8.075	29.952	21.065	66.217	134.116
Outrostipos	4.948	4.537	16.829	11.836	37.207	75.357
Total	143.006	131.120	486.363	342.055	1.075.258	2.177.802

Fonte: MaxiQuim Assessoria de Mercado (2004)

A reciclagem de resíduo plástico pós-uso no Brasil está distribuída conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6- Distribuição regional da reciclagem de plástico pós-uso no Brasil

Tipo de resíduo plástico	Centro - Oeste	Norte	Nordeste	Sul	Sudeste	Brasil
PET	0	0	23.221	37.472	88.615	149.308
PEAD	3.742	0	10.817	14.177	33.871	62.607
PVC	0	0	4.903	4.669	7.481	17.053
PEBD/PELBD	3.575	0	5.796	24.198	46.272	79.841
PP	1.618	0	7.480	5.383	26.558	41.039
OS	0	0	0	2.753	3.550	6.303
Outros tipos	0	0	0	925	2.058	2.983
Total	8.935	0	52.217	89.577	208.405	359.134

Fonte: MaxiQuim Assessoria de Mercado (2004)

2.2.10 - Preço de resíduo de plástico no Brasil

O preço do material reciclado é classificado pelo mercado de reciclagem e varia de acordo com a região e o tipo de material. Para o uso na injeção do Alto Forno não são necessários requisitos de limpeza ou uniformidade; assim sendo, este preço é apenas uma referência. Um fator importante na composição do preço do plástico é o de escala; para grandes volumes negociados o preço pode ser menor e mais atrativo. A Tabela 7 apresenta preços referenciais para plástico reciclado em diferentes cidades do Brasil.

Tabela 7- Preço de plástico para reciclagem

Localização	Plástico Rígido R\$ / t	PET R\$ / t	Plástico Filme R\$ / t
Guarapari	530 PL	700 PL	300
Brasilândia	350 L	400 PL	150 PL
Itabira	870 PL	850 PL	1200 PL
Lavras	800	500	900
Recife	1100 PL	500 P	1000
Porto Alegre	300 PL	700 PL	400 P
Blumenau	200	800 P	600
Campinas	600 PL	850 PL	1000 PL
Guarujá	800 PL	850 PL	700 PL
Santo André	-	1000 L	800 PL
São Bernardo	800 P	750 P	500 P
São Paulo	200 L	750 PL	400 PL
Aracaju	500 L	300 L	500 PL

Nota: P- Prensado, L= Limpo

Fonte: CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem

2.3 – UTILIZAÇÃO DE PNEUS DESCARTADOS

A utilização de pneus descartados como combustível em Alto Forno apresenta um grande potencial de desenvolvimento. Atualmente a Produção de pneus descartados /inservíveis é grande e crescente. Em geral este acúmulo gera problemas de saúde pública, ambiental e social na medida em que não são adequadamente armazenados, reciclados ou lhes é dada uma destinação final própria.

A injeção de pneus em Altos Fornos é aplicada para os casos de pneus sucateados, danificados e que não apresentam qualidade e características de reaproveitamento para remoldagem. Como rejeito, este pneu possui baixo valor agregado, mas como combustível pode se transformar em um produto com elevado valor agregado.

Segundo Araújo Filho (2006), os resultados preliminares da injeção de pneu moído através das ventaneiras do Alto Forno indicam boa capacidade de combustão, evidenciando ser um bom material para substituir o carvão pulverizado mineral ou vegetal. Outro fator importante a ser levado em conta é conhecer a composição do pneu, visando viabilizar sua participação como elemento fornecedor dos elementos químicos necessários para a reação de redução do minério de ferro. Da composição básica de um pneu constam borracha, aço e fibras, conforme mostra a Figura 14.

Fonte: Andrietta (2002)

Figura 14 – Composição de um pneu

Conforme apresentado na Tabela 8, a composição química do pneu fornece ao processo de redução do ferro gusa carbono e hidrogênio, elementos químicos necessários para a reação redutora do minério de ferro em ferro metálico. Os elementos químicos óxido de zinco e enxofre são indesejáveis no processo de redução do minério de ferro e devem ser dosados em quantidades

pré-estabelecidas para que não provoquem danos ao corpo do Alto Forno, bem como às suas instalações auxiliares.

Tabela 8 – Composição química do pneu

Elemento	% massa
Carbono	70,0
Hidrogênio	7,0
Ferro	15,0
Óxido de Zinco	1,2
Enxofre	1,3
Outros	5,5

Fonte: Andrietta (2002)

A composição do pneu varia em função do seu tipo, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Composição do pneu por tipo

Material %	Automóvel	Caminhão
Borracha / Elastômeros	48	45
Negro de fumo	22	22
Aço	15	25
Tecido de nylon	5	-
Óxido de Zinco	1	2
Enxofre	1	1
Aditivos	8	5

Fonte: Andrietta (2002)

O processo de utilização de pneus em Altos Fornos consiste na injeção de pneu moído diretamente na ventaneira. Para este fim o pneu precisa ser triturado, moído e a parcela metálica removida através de separação magnética. O trabalho desenvolvido por Araujo Filho *et al.* (2006) apresenta o esquema de injeção de materiais no Alto Forno conforme Figura 15. O pó de pneu armazenado no silo é transportado através de uma mistura fluida com ar até o Alto Forno. Esta mistura é introduzida na ventaneira através de uma lança, direcionando o pó diretamente na região de combustão do Alto Forno onde a temperatura está acima de 2.000°C. Nesta temperatura, ocorre a gaseificação imediata da borracha com a dissociação do carbono e do hidrogênio.

Figura 15 – Esquema para injeção de pneu através das ventaneiras

O trabalho desenvolvido por Araújo Filho et al. (2006) simulou a injeção através de um simulador composto por um forno de pré-aquecimento, que simula o regenerador, um forno de temperatura elevada que simula a região de combustão do Alto Forno e de um ponto para a alimentação da amostra a ser ensaiada que simula a lança de injeção. A granulometria do material injetado apresenta tamanho de partícula entre 0,074 e 0,104 mm. Os resultados da injeção de pneu moído e a taxa de combustão são mostrados na Tabela 10. A taxa de combustão é a quantidade de carbono elementar oxidado a CO/CO₂.

Tabela 10 - Taxa de injeção x índice de combustão do pneu

Quantidade injetada (kg/t gusa)	40	120
Taxa de combustão	92	78

A Tabela 11 mostra os resultados da injeção de carvão mineral e a taxa de combustão. O carvão mineral é um material normalmente injetado e cuja granulometria de referência é 76,2% do total de partículas menores que 0,104 mm.

Tabela 11 - Taxa de injeção x índice de combustão do carvão

Quantidade injetada (kg / t gusa)	160
Taxa de combustão	87

Comparativamente ao carvão mineral, o pneu moído apresenta taxa de combustão equivalente para valores de injeção de pneu moído próximo de 40 kg/t gusa, indicando possibilidade de se praticar valores de injeção de pneu moído da ordem de 50 kg/t gusa.

2.3.1- Produção de pneus novos no Brasil

O volume de produção de pneus novos é um indicador importante para se determinar a disponibilidade futura desta fonte energética alternativa no contexto do presente trabalho. A Figura 16 apresenta a produção anual de pneus novos no Brasil e estima-se que, desde o início de sua produção na década de 1930, já se tenha chegado ao valor acumulado de 860 milhões de unidades produzidas até o ano 2000. Embora os dados se limitem ao ano 2000, com defasagem de uma década nos dados apresentados na Figura 16, observa-se uma forte tendência de crescimento no número de unidades por ano no período entre 1980 e 2000, fato corroborado pelos sucessivos recordes de vendas de veículos novos no país ao longo dos últimos anos.

Fonte: ANIP/Dados finais do período de 1993-1997/ Fonte:Geipot

Figura 16 - Produção anual de pneus no Brasil

O ciclo de vida de um pneu pode ser estabelecido em uma sucessão de estágios, desde a extração da matéria prima até sua destinação final, como descrito na Figura 17.

Fonte: Beukering; Janssen (2001).

Figura 17 – Ciclo de vida de um pneu

2.3.2- Cadeia de pneus inservíveis

Segundo Serra (2004), a cadeia de reciclagem de pneus no Brasil é representada na Figura 18. A reciclagem como regra é incipiente, sendo a exceção composta por agentes de reforma de pneus (borracheiros, recauchutadores, recapadores e remoldadores), atuando principalmente em pneus de ônibus e caminhões.

Fonte: IPT, 2004

Figura 18 – Cadeia de pneus inservíveis

A cadeia de reciclagem secundária é composta pela coleta, armazenamento temporário, a laminação para pneus convencionais e trituração para os pneus radiais. A coleta é a parcela mais crítica devido a limitações e dificuldades de manuseio e transporte, sendo realizada principalmente por sucateiros que recolhem os pneus de revendedores, borracheiros, empresas de transporte de carga frota de ônibus ou táxi. Destinam-se a reciclagem primária, secundária ou para voltar ao mercado como pneu usado.

2.3.3- Produção e destino de Pneus no Brasil

A Figura 19 apresenta o destino dos pneus, conforme IPT (2004); tal pesquisa revela que 3,8 milhões de pneus inservíveis não têm destino conhecido, sendo, portanto, uma potencial fonte de suprimento de matéria prima para futuro aproveitamento.

Fonte: IPT (2004)

Figura 19 – Produção e destino de pneus no Brasil

Conforme instrução normativa número 8 do IBAMA de 15 de maio de 2002, o peso de um pneu inservível é conforme mostra a Tabela 12.

Tabela 12 – Peso de Pneu inservível

Tipo do Pneu	Peso (kg)
Pneu de automóvel	5
Pneu de Carga	40

Fonte: IBAMA (2004)

2.3.4- Custo de Co-processamento de pneu

De acordo com Lagarinhos (2008), o custo para o co-processamento de pneus usado como substituto do óleo combustível e do carvão, em fornos de usinas cimenteiras, é de US\$ 15 a 20 por tonelada de pneu. Este custo serve como referência para uso no Alto Forno.

3 METODOLOGIA E APLICACÃO

Usinas siderúrgicas integradas são aquelas que possuem todo o ciclo de produção, compreendendo a redução, o refino e a laminação. A ArcelorMittal Tubarão é uma siderúrgica do tipo integrada localizada em Jardim Limoeiro – Serra – Espírito Santo – Brasil. É uma empresa que pertence ao grupo ArcelorMittal e produz aços planos na forma de bobinas a quente e placas semi-acabadas. Sua capacidade nominal de produção é de 7,5 Mt/a.

A ArcelorMittal produz aço através do processamento do ferro gusa líquido obtido em Alto Forno a partir do minério de ferro, do coque e do carvão mineral como agente redutor. A transformação do ferro gusa em aço, processo conhecido como refino, é feita através de fornos a oxigênio na aciaria. A configuração e o fluxo de produção completo da ArcelorMittal tubarão são mostrados na Figura 20.

Figura 20 - Fluxo de produção da ArcelorMittal Tubarão

O Alto Forno 1 faz parte da área de produção de gusa, a qual engloba 03 unidades produtivas: Alto Forno 1, Alto Forno 2 e Alto Forno 3. O Alto Forno 1 foi implantado na fase inicial da ArcelorMittal Tubarão e sua produção de gusa – *blow in* – se iniciou em 30 de novembro de 1983 com produção anual prevista de 3,0 Mt/a de gusa líquido. Inicialmente sua campanha (período contínuo de produção sem parada para reforma) era de 7 anos. Entretanto, devido ao seu bom desempenho técnico e operacional, tornou-se o alto forno mais produtivo do mundo ao alcançar a marca acumulado de 70 milhões de toneladas de ferro gusa produzidos em uma única campanha (período de tempo de produção sem sofrer parada para a reforma).

Atualmente, sua campanha está em 26 anos de produção sem sofrer reforma. A previsão é de que esta ocorra em 2012, quando então o mesmo terá completado 30 anos de campanha. O Alto Forno 1 está mostrado na parte central da área de produção de gusa da Figura 21.

Figura 21 – Alto Forno 1 e a área de produção de gusa da ArcelorMittal Tubarão

3.1 – Características Técnicas do Alto Forno 1

Apresentam-se, na sequência, características técnicas do Alto Forno 1, objeto da análise do presente trabalho.

3.1.1 Alto Forno Próprio

Produção:	3.000.000 t/ano
Tipo:	Throat bracket type
Volume interno:	4415 m ³
Volume de trabalho	3707 m ³
Diâmetro do cadinho:	14 m
Furos de gusa:	4
Ventaneiras:	38
Sistema de refrigeração - cadinho:	Tubo de refrigeração (água recirculada)
Sistema de refrigeração - carcaça:	<i>Trocadores de calor (staves)</i> com água desmineralizada
Analizador de gás de cuba:	Êmbolo de 9800 mm

3.1.2 - Regeneradores

Tipo:	Koopers com câmara de combustão externa
Quantidade:	4
Área de aquecimento:	4 x 89.900 m ²
Temperatura do gás de combustão:	1463 °C
Temperatura de sopro:	1300 °C
Modo de operação:	<i>Staggered parallel</i>

3.1.3 – Limpeza de gás

Coletor de pó:	Tipo separador por gravidade vertical
Venturi Scrubber:	2 - Venturi <i>Scrubbers</i> com arranjo em série
Particulado no gás de saída:	5 mg/Nm ³

3.1.4 – Equipamento de carregamento

Tipo:	2 cones - <i>Gas Seal Valve</i>
Systema de carregamento:	Correia transportadora
Capacidade de carregamento:	222 cargas/dia
Cone Grande:	8200 mm 53° 750 mm de curso
Cone pequeno:	3500 mm 53/60° 750 mm de curso
Revolving Chute:	<i>Single Port</i> 12 rpm
Placas Móveis:	Tipo GHH - 18 placas - 1000 mm de curso

3.1.5 – Pressão de Topo

Tipo:	4 válvulas Septum tipo borboleta 600 mm x 2 - 850 mm x 2
Pressão de topo:	2.5 kgf/cm ² - máxima
Sistema de equalização:	Primário: Gás semi-limpo Secundário: Nitrogênio

3.1.6 – Casa de corrida

Mud Guns:	tipo acionamento hidráulico
Capacidade:	0.27 m ³
Opener:	<i>Boom swing pneumatic driven type</i>
Runner:	<i>Main Iron Trough: Replaceable type</i> 22,000 (L) x 2,200 (W)
Tilting Runner:	<i>electric driven type</i>
Slag Granulating:	<i>Nagata type</i> 2,800 t/d x 2
Slag Dry Pit:	1200 m ² x 4
Dedusting System:	<i>Bag Filter type</i> 10,000 Nm ³ /min x 2

3.1.7 – Sistema de injeção de carvão pulverizado

3.1.7.1- Sistema de Moagem

Tipo:	Kuttner
Tipo:	Rolos fixos (03)
Capacidade:	94 t/h
Gás de transporte:	Combustão de BFG
Silo de estocagem de carvão:	500 m ³
Transporte de carvão:	Correia transportadora

3.1.7.2 – Sistema de injeção

Tipo:	Fase Densa
Capacidade:	60 t/h x 2 linhas
Gás de transporte:	Nitrogênio
Consumo:	200 Nm ³ /t - carvão
Pressão:	Max: 15 kgf/cm ²
Vaso de injeção:	3 vasos em paralelo
Silo de estocagem de carvão fino:	2300 m ³

3.1.8 – Turbina de topo

Tipo:	Axial
Capacidade:	20 MW
Fornecedor:	Kawasaki Heavy / Meiden

3.1.9 – Dimensões do Alto Forno

O perfil dimensional do Alto Forno está mostrado na Figura 22.

Obs: medidas em milímetros

Figura 22 – Perfil do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão

3.2 – Configuração do Alto Forno 1

O Alto Forno 1 está configurado conforme mostra a Figura 23. Possui todas as unidades periféricas essenciais ao seu funcionamento do ponto de vista de fornecer os produtos de entrada bem como receber os produtos de saída. O gusa é utilizado na produção do aço, a escória é utilizada na produção de cimento e a lama e o pó são destinados a produção de telhas e tijolos.

Figura. 23 – Arranjo esquemático da configuração do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão

3.2.1 – Unidade de Carregamento

É a responsável pelo envio de matéria prima sólida do Alto Forno: síter, pelota, minério bitolado, coque e fundente. Composta por silos de abastecimento, balanças, peneiras e correias transportadoras, além de sistemas de despoeiramento e de controle ambiental. Nesta unidade, a carga do Alto Forno é selecionada e preparada em função da quantidade e do material a ser carregado em cada fase do programa de carregamento do alto forno. Cada material é descarregado numa correia transportadora única que envia de forma sequencial cada material selecionado pelo Alto Forno de acordo com a quantidade e tipo.

Para alimentação de materiais no alto forno utiliza-se o sistema de carregamento em lotes (*batches*), lotes bem definidos, normalmente separados em coque e minérios (sínter, pelotas, minérios). Para a formação dos lotes, os materiais que os compõem são pesados e armazenados num silo de espera (*surge hopper*) até o momento de enviá-los ao topo do Alto Forno 1. A Figura 24 ilustra o carregamento dos materiais no topo do Alto Forno 1.

Figura 24 – Fluxograma de carregamento do Alto Forno 1

3.2.2 – PCI – *Pulverized Coal Injection* – Injeção de Carvão Pulverizado

É responsável pelo processamento e preparação do carvão a ser injetado nas ventaneiras, conforme mostra a Figura 25. A mistura de carvões é preparada em função da qualidade esperada do gusa e do custo da mistura. Geralmente é uma composição de carvões de baixo custo e não

coqueificáveis, incluindo os antracitos. Após a preparação, a mistura é injetada no corpo do Alto Forno através de suas 38 ventaneiras; a Figura 26 ilustra uma ventaneira em corte. Cada ventaneira possui 02 lanças de injeção, como é apresentado na Figura 27.

Figura 25 – Fluxograma de preparação do carvão pulverizado

Figura 26 – Desenho em corte de uma ventaneira de Alto Forno

Figura 27 – Ventaneira do Alto Forno 1 mostrando as lanças de injeção de carvão pulverizado

3.2.3 – Regeneradores

Os regeneradores são responsáveis pelo aquecimento do ar de sopro do Alto Forno. A troca térmica é feita pela combustão de uma mistura de gás de coqueria e de Alto Forno. O ar entra nos regeneradores à temperatura média de 200°C e sai a 1300°C, para ser então enviado para o processo de redução do minério no Alto Forno, como ilustrado na Figura 28.

Figura 28 – Ilustração da composição dos regeneradores no Alto Forno

3.3 – Matéria prima e insumos

A coleta de dados realizada no mês de julho de 2009 registra a relação completa dos materiais que compõem a carga do Alto Forno 1. Todos os dados operacionais no período de 01 a 31/07/09 estão disponíveis nas tabelas mostradas no Anexo 1. Neste período a participação de cada elemento varia em função da demanda de produção e da qualidade e desempenho operacional do Alto Forno, que por sua vez depende da estabilidade do processo de redução e equilíbrio térmico. Discriminam-se, em seguida, os materiais que compõem as entradas 1 e 2, bem como a saída do Alto Forno, tal como é apresentado esquematicamente na Figura 29. Adotou-se tal estrutura de entradas e saídas pelo fato de ser a mesma adotada para a coleta de parâmetros do sistema supervisor de produção.

Figura 29 – Balanço de massa: Entradas e saídas

Entradas 1:

- 1- Minério;
- 2- Sínter Direto;
- 3- Sínter do Pátio;
- 4- Pelota;
- 5- Sucata de Aço;
- 6- Sucata de Gusa;
- 7- *Small Sinter*;
- 8- Quartzos;
- 9- Coque do CDQ;
- 10- *Small Coke*;
- 11- Carvão do PCI;

Entradas 2:

- 1- Volume de sopro - ar;
- 2- Umidade de sopro – injeção de vapor;
- 3- Taxa de enriquecimento – injeção de oxigênio;

Saídas:

- 1- Gusa;
- 2- Escória;
- 3- Gás de Alto Forno – BFG;
- 4- Pó do coletor;

3.4 – Balanço de Massa

A primeira etapa de levantamento da viabilidade técnica para a injeção de plástico e/ou pneu no Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão é a elaboração do balanço de massa real com base na informação da produção do Alto Forno 1 no mês de julho de 2009 segundo dados coletados a partir do sistema supervisório de produção.

Não é objetivo do presente trabalho obter o balanço de massa completo do Alto Forno 1, mas sim obter e estabelecer um parâmetro de controle que possibilite avaliar comparativamente o impacto, ou seja, a variação neste balanço ao se adicionar ou modificar a composição da massa de entrada em relação à massa de saída.

3.4.1 – Equacionamento do balanço de massa

O Alto forno é um processo de produção contínuo, porém suas entradas e saídas são programadas e periódicas ao longo do dia. O equilíbrio entre as entradas e saídas ocorre efetivamente de modo a garantir a estabilidade operacional do Alto Forno. A estabilidade ocorre pelo atendimento das condições necessárias para a realização da reação de redução do minério ferro em ferro metálico.

O corpo do Alto Forno 1 é o volume de controle VC que permanece fixo com massa em regime permanente. Nele entra a vazão em massa $\dot{m}_e = \text{Entradas 1} + \text{Entradas 2}$ e sai a vazão em massa $\dot{m}_s = \text{Saídas}$, como ilustrado na Figura 30. Assim sendo, pela equação da continuidade tem-se que a taxa de variação de massa no volume de controle VC é igual ao somatório das vazões em massa de entradas menos o somatório das vazões em massa de saída:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (5)$$

Figura 30 – Volume de controle aplicado sobre o Alto Forno 1

O Alto Forno apresenta um volume de controle relativamente a um processo de produção que é contínuo, embora as entradas e saídas sejam feitas de forma periódicas ao longo do dia. Desta forma, é uma condição essencial que não haja acúmulo de massa no seu interior. Embora seja verdade que entre uma retirada e outra há acúmulo das massas de saída, o Alto Forno é projetado para permitir este armazenamento momentâneo entre o intervalo de uma e outra retirada. Cada retirada é denominada de corrida e nela é drenado gusa e escória suficiente para permitir volume interno suficiente para a próxima acumulação.

No período em avaliação e contabilização das massas, que é de 24 horas, a taxa de variação de massa no volume de controle é igual a zero – regime permanente; desta forma, tem-se que o somatório de vazão em massa na entrada é igual ao somatório de vazão em massa na saída.

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (6)$$

sendo:

$$\begin{aligned} \sum \dot{m}_e &= \text{vazão em massa de minério} + \text{vazão em massa de Sinter Direto} \\ &+ \text{vazão em massa de Sinter do Pátio} + \text{vazão em massa de pelota} \\ &+ \text{vazão em massa de Sucata de Aço} + \text{vazão em massa Sucata de Gusa} \\ &+ \text{vazão em massa de } \textit{Small Sinter} + \text{vazão em massa de Quartzo} \\ &+ \text{vazão em massa de Coque CDQ} + \text{vazão em massa de } \textit{Small Coke} \\ &+ \text{vazão em massa de carvão injetado (PCI)} + \text{vazão em massa de ar soprado} \\ &+ \text{vazão em massa de oxigênio injetado} \\ \sum \dot{m}_s &= \text{vazão em massa de Gusa} + \text{vazão em massa de Escória} \\ &+ \text{vazão em massa de pó do coletor de pó} + \text{vazão em massa de gás BFG.} \end{aligned}$$

A tabela completa com todas as vazões em massa de entrada é apresentada no Anexo 2, ao passo que a tabela completa com todas as vazões em massa de saída é listada no Anexo 3.

Com os valores das entradas e saídas obtidos através dos dados operacionais do mês de julho/2009 do Anexo 1 – Dados operacionais do Alto Forno 1 - e substituindo na equação (6), são obtidos os resultados apresentados na Tabela 13 e graficamente representadas na Figura 31.

Tabela 13 – Dados e relação de entrada e saída de vazão em massa

Data	$\sum \dot{m}_s$ (t/dia)	$\sum \dot{m}_e$ (t/dia)	Taxa entrada / saída
01/07/2009	7805,43	5513,44	0,706
02/07/2009	0,00	220,05	0,000
03/07/2009	9667,21	9275,99	0,960
04/07/2009	21227,43	20299,63	0,956
05/07/2009	17528,79	17251,12	0,984
06/07/2009	31580,43	31196,92	0,988
07/07/2009	32540,74	32465,92	0,998
08/07/2009	32523,75	32678,15	1,005
09/07/2009	33598,08	32938,12	0,980
10/07/2009	33044,76	32975,45	0,998
11/07/2009	32852,40	32778,36	0,998
12/07/2009	33162,28	33031,12	0,996
13/07/2009	33126,26	32823,29	0,991
14/07/2009	33373,52	32987,05	0,988
15/07/2009	33000,68	32911,66	0,997
16/07/2009	33115,85	32944,05	0,995
17/07/2009	33164,42	33115,97	0,999
18/07/2009	32986,79	33045,02	1,002
19/07/2009	32068,73	32368,16	1,009
20/07/2009	32675,67	32653,24	0,999
21/07/2009	33158,72	32790,28	0,989
22/07/2009	33039,90	32897,18	0,996
23/07/2009	33068,84	32839,87	0,993
24/07/2009	33139,42	32934,65	0,994
25/07/2009	33107,82	32968,91	0,996
26/07/2009	32943,68	32949,75	1,000
27/07/2009	33043,81	33096,42	1,002
28/07/2009	29551,18	29687,91	1,005
29/07/2009	0,00	218,68	0,000
30/07/2009	22095,83	22232,86	1,006
31/07/2009	32560,90	32468,02	0,997

Figura 31 - Gráfico do balanço de vazão em massa

3.4.2 – Relação entre vazão em massa de entrada e saída

Os materiais ao serem carregados no Alto Forno sofrem uma reação química que se inicia nas camadas superiores da carga e se completa na zona de combustão e no cadinho. Parte da massa carregada é composta de materiais que se volatilizam no interior do Alto Forno, como é o caso do carvão pulverizado e do coque. De todo o carvão injetado e do coque carregado, somente o seu teor de cinzas é que se transforma efetivamente em massa de saída, sendo que o restante se transforma em gases de redução e voláteis que são incorporados ao gás gerado – o gás de Alto Forno – BFG.

A relação entre a vazão de entrada e a vazão de saída mostrada na Tabela 13 será mantida como referência para a avaliação do uso de plástico e pneus. A base para comparação será a curva mostrada no gráfico da Figura 32, que apresenta a razão entre a vazão em massa de saída em relação à vazão em massa de entrada no intervalo dos dias 06/07/09 a 28/07/09. Neste período, excluem-se do comportamento da operação/marcha do Alto Forno variações decorrentes de parada operacional.

Gráfico da relação entre a massa de entrada e de saída do Alto Forno 1

Figura 32 - Gráfico da relação da massa de entrada / saída

3.4.3 – Parâmetro de correlação entre massa de entrada e saída

A correlação entre a massa de saída e de entrada – Taxa saída/entrada - do Alto Forno 1 no período de 01 a 31/07/09 é o parâmetro utilizado na avaliação da variação da composição da massa de entrada em relação ao desempenho e balanço de massa real do Alto Forno 1. O balanço de massa para a injeção de plástico ou pneu está elaborado como base no carvão pulverizado injetado no Alto Forno 1.

O percentual de adição de plástico e pneu foi calculado visando manter a participação dos elementos químicos da composição original da mistura de carvões puros. O valor da composição química da mistura de carvões puros é calculado com base nos requisitos operacionais do Alto Forno e de qualidade do gusa produzido. Com base nesta premissa, na mistura considerada e no balanço geral de massa, os percentuais de participação de plástico e pneu na mistura de carvões é: plástico = 12%; pneu = 4%.

Na Tabela 14 observam-se os percentuais de cada elemento na composição do carvão puro injetado. O carvão injetado é sempre uma composição de até 3 carvões com composição química conhecida - qualidade; na Tabela 13, a mistura de carvões é composta de 20% do carvão

tipo A (código GS 75) , 80% do carvão tipo B (código COP 29) e 0% do carvão tipo C (código MN1), resultando na Qualidade Total, que é a composição química média final decorrente da participação dos carvões A e B e C.

Tabela 14 – Composição de carvões e a análise química resultante

Carvão A	%	Carvão B	%	Carvão C	%
GS 75	20	COP 29	80	MN 1	0

Elemento	Qualidade A	Qualidade B	Qualidade C	Qualidade Total
C	79,90	82,99	77,76	82,372
H	5,29	3,76	5,25	4,066
S	0,66	0,29	0,96	0,364
MV	37,6	13,6	36,7	18,400
CINZA	5,29	8,70	6,89	8,018
O ₂	7,50	3,03	7,75	3,924
N	1,36	1,53	1,43	1,496
T. Fe	4,98	4,41	7,54	4,524
FeO	0	0	0	0
SiO ₂	58,05	45,3	56,34	47,850
Al ₂ O ₃	21,2	37,6	19,03	34,320
CaO	3,2	2,32	4,49	2,496
MgO	2,4	0,98	3,02	1,264
TiO ₂	1	1,53	1,02	1,424
Mn	0,1	0,02	0,08	0,036
P	0,09	0,795	0,081	0,654
S	1,82	0,208	0,92	0,530
Zn	0,02	0,011	0,024	0,013
Na ₂ O	0,44	0,88	0,54	0,792
K ₂ O	1,7	1,53	1,51	1,564

Na Tabela 15 são mostradas a qualidade e quantidade da composição do carvão com a adição de plástico – PL1. O resultado do balanço está mostrado na coluna Qualidade Total. Nesta tabela, a mistura de carvões é composta de 0% do carvão A, 88% do carvão B e 12 % de plástico C – PL1, resultando na qualidade e quantidade mostrada na coluna Qualidade Total.

Os percentuais de variação de carbono, hidrogênio, enxofre e cinzas são obtidos em relação à mistura de carvões puros (entende-se por “variação” a variação média final dos elementos químicos carbono, hidrogênio, enxofre e cinzas, decorrente do uso de 12% de plástico PL1 misturado ao carvão A – GS75 com 0% e ao carvão B – COP 29 com 88%, comparados com seus valores iniciais quando da mistura original de carvões e sem a participação do plástico PL1).

Destaca-se o aumento de 14,357% de hidrogênio e variações não relevantes de carbono e enxofre.

Tabela 15 – Composição de carvões e plástico com a análise química resultante

Carvão A	%	Carvão B	%	Plástico C	%
GS 75	0	COP 29	88	PL1	12

Elemento	Qualidade A	Qualidade B	Qualidade C	Qualidade Total
C	79,90	82,99	77,81	82,368
H	5,29	3,76	11,99	4,748
S	0,66	0,29	0,9	0,363
MV	37,6	13,6	36,7	16,372
CINZA	5,29	8,7	4,9	8,244
O ₂	7,50	3,03	7,75	3,596
N	1,36	1,53	1,43	1,518
T. Fe	4,98	4,41	7,54	4,785
FeO	0	0	0	0
SiO ₂	58,05	45,30	56,34	46,625
Al ₂ O ₃	21,2	37,6	19,03	35,372
CaO	3,2	2,32	4,49	2,580
MgO	2,4	0,98	3,02	1,225
TiO ₂	1	1,53	1,02	1,469
Mn	0,1	0,02	0,08	0,027
P	0,09	0,795	0,081	0,709
S	1,82	0,208	0,92	0,293
Zn	0,02	0,011	0,024	0,013
Na ₂ O	0,44	0,88	0,54	0,839
K ₂ O	1,7	1,53	1,51	1,528

Adição PL1=	12 %	>>>	Carbono =	-0,004 %
			Hidrogênio =	14,357 %
			Enxofre =	-0,220 %
			Cinzas =	2,741 %

Na Tabela 16 são apresentadas a qualidade e quantidade da composição do carvão com a adição de pneu – PN1. O resultado do balanço está apresentado na coluna Qualidade Total. Nesta tabela a mistura de carvões é composta de 10% do carvão A, 86% do carvão B e 4 % de pneu – PN1, resultando na qualidade e quantidade mostradas na coluna Qualidade Total. Os percentuais

de variação de carbono, hidrogênio, enxofre e cinzas são obtidos em relação à mistura de carvões puros.

Neste balanço, com a adição de 4% de pneu, ocorreu um aumento de 0,925% no enxofre e variações não relevantes de carbono e hidrogênio.

Tabela 16 – Composição de carvões e pneu com a análise química resultante

	Carvão A	%	Carvão B	%	Pneu C	%
	GS 75	10	COP 29	86	PN 1	4
Elemento	Qualidade A	Qualidade B	Qualidade C	Qualidade Total		
C	79,90	82,99	70,00	82,161		
H	5,29	3,76	7,00	4,042		
S	0,66	0,29	1,30	0,367		
MV	37,6	13,6	20,96	16,294		
CINZA	5,29	8,7	6,15	8,257		
O ₂	7,5	3,03	2,68	3,463		
N	1,36	1,53	2,13	1,537		
T. Fe	4,98	4,41	6,24	4,540		
FeO	0	0	0	0		
SiO ₂	58,05	45,3	43,80	46,515		
Al ₂ O ₃	21,2	37,6	24,60	35,44		
CaO	3,2	2,32	8,26	2,645		
MgO	2,4	0,98	3,43	1,22		
TiO ₂	1	1,53	0,72	1,444		
Mn	0,1	0,02	2,66	0,133		
P	0,09	0,795	0,500	0,712		
S	1,82	0,208	2,50	0,461		
Zn	0,02	0,011	0,035	0,013		
Na ₂ O	0,44	0,88	0,36	0,815		
K ₂ O	1,7	1,53	1,54	1,547		

Adição PN1=	4 % >>>	Carbono	=	-0,256 %
		Hidrogênio	=	-0,579 %
		Enxofre	=	0,925 %
		Cinzas	=	2,894 %

3.5 – Balanço de Energia

A segunda etapa de levantamento da viabilidade técnica para a injeção de plástico e/ou pneu no Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão é a da elaboração do balanço de energia real com base na informação da produção do Alto Forno no mês de julho de 2009 com dados coletados a partir do sistema informatizado de controle da produção. O mesmo volume de controle da Figura 29 é aqui utilizado para a análise do balanço de energia.

Da primeira Lei da Termodinâmica para volume de controle, obtém-se a equação (7).

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gZ_s \right) \quad (7)$$

Para processos em regime permanente, a taxa de variação da energia no interior do volume de controle é zero; deste modo, a equação (8) representa a condição em regime permanente.

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gZ_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gZ_s \right) \quad (8)$$

O regime permanente aplicado ao caso do Alto Forno 1 implica que o balanço de energia com a matéria prima atualmente em uso (carvão mineral pulverizado) será utilizado como parâmetro de comparação quando da utilização dos materiais alternativos; esta será a linha de referência para a avaliação final na utilização combinada de plástico e pneu em substituição parcial ao carvão mineral pulverizado.

Para tanto, admitiu-se que as perdas de energia decorrentes do sistema de resfriamento da carcaça e cadinho, perda por radiação térmica da carcaça e perda por equalização de pressão no carregamento, por exemplo, permanecerão inalteradas independentemente da alteração da composição da carga de carvão pulverizado ou plástico e pneu injetados. Entretanto, a contribuição energética decorrente da modificação na composição da carga de carvão será considerada mediante o aporte térmico/energia nos produtos de saída – gusa, escória, pó e gás.

3.5.1 Equacionamento do Balanço de Energia

No equacionamento do balanço de energia as seguintes variáveis serão consideradas:

VS	= vazão de sopro (Nm^3/t de gusa)
CR	= taxa de carregamento de coque (kg/t de gusa)
IV	= injeção de vapor (g/ Nm^3)
TS	= temperatura de sopro ($^{\circ}\text{C}$)
$C_p(\text{VS})$	= calor específico do ar (kcal/Nm^3)
EO_2	= enriquecimento com oxigênio (%)
$\text{N}_2(\text{VS})$	= nitrogênio na vazão de sopro (%)
$\text{N}_2(\text{Topo})$	= nitrogênio no gás do topo – BFG (%)
$\text{CO}(\text{Topo})$	= monóxido de carbono no gás do topo – BFG (%)
$\text{CO}_2(\text{Topo})$	= dióxido de carbono no gás do topo – BFG (%)
$\text{H}_2(\text{Topo})$	= hidrogênio no gás do topo – BFG (%)
SR	= taxa de Produção de escória ($\text{kg de escória /t de gusa}$)
C	= carbono presente no gusa (%)
Si	= silício presente no gusa (%)
Mn	= manganês presente no gusa (%)
P	= fósforo presente no gusa (%)
T_{gusa}	= temperatura do gusa ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{gás BFG}}$	= temperatura do gás do topo ($^{\circ}\text{C}$)

Para a realização do balanço de energia no Alto Forno 1 foram admitidas algumas premissas, a saber:

- Não há realização de trabalho no volume de controle;
- Despreza-se a energia cinética no processo;
- A parcela de energia potencial é desprezível;
- A análise será feita de forma específica, tomando-se por referência a quantidade produzida em tonelada de gusa.

Deste modo, obtém-se a equação (9).

$$0 = -Q_{vc} + \sum m_e h_e - \sum m_s h_s \quad (9)$$

Reescrevendo a equação (9) e mantendo válidas as condições de contorno para as novas variáveis descritas a seguir:

$$\text{Energia térmica que entra (i, inlet):} \quad H_i = \sum \dot{m}_e h_e$$

$$\text{Energia térmica que sai (o, output):} \quad H_o = \sum \dot{m}_s h_s$$

$$\text{Energia térmica perdida (l, loss):} \quad H_l = Q_{vc}$$

deduz-se que

$$H_i = H_o + H_l \quad (10)$$

A discriminação das diversas energias térmicas envolvidas é realizada com base nos elementos envolvidos no processo de transformação que ocorre no Alto Forno. As quantidades de energia envolvidas na energia térmica que entra no Alto Forno são explicitadas na equação (11).

$$H_i = H_{i1} + H_{i2} + H_{i3} + H_{i4} = \sum_{n=1}^{n=4} H_{in} \quad (11)$$

sendo:

H_{i1} = calor de combustão do carbono (coque, carvão);

H_{i2} = calor sensível do ar de sopro;

H_{i3} = calor da redução indireta (reação pelo CO);

H_{i4} = calor de formação da escória;

As quantidades de energia envolvidas na energia térmica que sai do Alto Forno são explicitadas na equação (12).

$$H_o = H_{o1} + H_{o2} + H_{o3} + H_{o4} + H_{o5} + H_{o6} + H_{o7} = \sum_{n=1}^{n=7} H_{on} \quad (12)$$

sendo:

H_{o1} = calor da reação *solution loss*²;

H_{o2} = calor da redução do hidrogênio;

H_{o3} = calor sensível do gás BFG;

H_{o4} = calor sensível do ferro gusa e da escória;

H_{o5} = calor de redução pelo carbono do silício, manganês e fósforo;

H_{o6} = calor de decomposição do vapor – presente no ar de sopro;

H_{o7} = calor de evaporação da água – do coque, minério;

As quantidades de energia envolvidas na energia térmica perdida pelo Alto Forno são explicitadas na equação (13).

$$H_i = H_{i1} + H_{i2} + H_{i3} + H_{i4} = \sum_{n=1}^{n=4} H_{in} \quad (13)$$

sendo:

H_{i1} = calor removido/absorvido pelo sistema de resfriamento dos *staves* (trocadores de calor da carcaça, ventaneiras e cadinho do Alto Forno);

H_{i2} = calor removido por radiação da carcaça do Alto Forno;

H_{i3} = calor cedido pelo ar soprado no anel de vento do Alto Forno;

H_{i4} = variação da entalpia no interior do cadinho do alto Forno.

Desta forma, a equação final representativa do balanço de energia no Alto Forno é expressa pela equação (14).

$$H_{i1} + H_{i2} + H_{i3} + H_{i4} = (H_{o1} + H_{o2} + H_{o3} + H_{o4} + H_{o5} + H_{o6} + H_{o7}) + (H_{i1} + H_{i2} + H_{i3} + H_{i4}) \quad (14)$$

² *Solution loss* = O coque no estado sólido é parcialmente consumido pelo dióxido de carbono: $C(s) + CO_2(g) = 2CO(g)$.

3.5.2 Obtenção do Balanço de Energia

O balanço de energia será elaborado como uma variável específica em relação à produção de gusa do Alto Forno. O resultado será na unidade específica de kcal/t de gusa. Da mesma forma, as massas envolvidas no cálculo serão apresentadas em uma unidade específica por unidade de gusa, sendo apresentada com terminação *rate*. Por exemplo, *coque rate* = massa de coque por tonelada de gusa produzido (kg /t de gusa).

- **Cálculo da energia de entrada (H_i)**

- **H_{i1} = calor de combustão do carbono (coque e carvão):**

O calor de combustão do carbono é computado tomando-se a massa de cada componente de carbono multiplicado pelo respectivo poder calorífico (para o coque e para o carvão injetado), bem como a parcela dos componentes alternativos considerados (plástico e pneu), na temperatura de operação. A equação (15) apresenta a expressão correspondente.

$$H_{i1} = m_{\text{coque}} \text{PCI}_{\text{coque}} + m_{\text{carvão}} \text{PCI}_{\text{carvão}} + m_{\text{plástico}} \text{PCI}_{\text{plástico}} + m_{\text{pneu}} \text{PCI}_{\text{pneu}} \quad (15)$$

O carvão pulverizado injetado é totalmente consumido no momento da injeção; o coque, por sua vez, é consumido de forma lenta e gradual ao longo das reações químicas em função da disponibilidade de oxigênio do ar soprado e do hidrogênio do vapor, tal como é apresentado nas reações que seguem:

e

Assim sendo, a quantidade de carbono obtida a partir do coque será calculada de acordo com o balanço de entrada dos reagentes oxigênio e hidrogênio (provenientes da injeção de vapor no ar soprado), conforme equação (16).

$$m_{\text{coque}} = VS \left(0,21 + \frac{EO_2}{100} \right) \cdot \left(\frac{12}{11,2} \right) + VS \cdot IV \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{12}{18} \right) - m_{\text{carvão}} \quad (16)$$

sendo:

VS = vazão de sopro (Nm^3/t de gusa)

EO₂ = enriquecimento com oxigênio (%)

IV = Injeção de vapor (g/Nm^3)

11,2/12 = relação em (g/Nm^3) relativo à proporção entre $\frac{1}{2}\text{O}_2$ e C

18/12 = relação em (g/g) relativo à proporção entre H_2O e C

▪ **Hi₂ = calor sensível do ar de sopro:**

O calor sensível do ar de sopro é obtido a partir da equação (17).

$$H_{i2} = VS \cdot TS \cdot C_p(VS) \quad (17)$$

sendo:

TS = Temperatura de sopro ($^{\circ}\text{C}$)

C_p(VS) = Calor específico do ar (em kcal/Nm^3)

Para efeito deste trabalho, na ArcelorMittal Tubarão são utilizados os seguintes valores para o calor específico do ar nas condições de temperatura operacionais:

C_p (VS) = 0,338 kcal/Nm^3 para (1000°C)

C_p (VS) = 0,340 kcal/Nm^3 para (1100°C)

C_p (VS) = 0,343 kcal/Nm^3 para (1200°C)

C_p (VS) = 0,345 kcal/Nm^3 para (1300°C)

▪ **Hi₃ = calor da redução indireta (reação pelo CO);**

O calor da redução indireta é obtido a partir da equação (18).

$$H_{i3} = \text{Fe}(\text{CO}) \cdot 60 \quad (18)$$

Nesta equação, o termo Fe(CO) representa o conteúdo de ferro reduzido pelo CO, que pode ser estimado pela equação (19); as quantidades envolvidas no conteúdo de ferro reduzido pelo gusa e pelo hidrogênio são estimados pela sequência de expressões definidas na reação

e determinadas pelas equações (20) a (23).

$$\text{Fe (CO)} = \text{Fe (gusa)} - \text{Fe (H}_2\text{)} \quad (19)$$

$$\text{Fe (gusa)} = 998 - 10 \cdot (\text{C} + \text{Si} + \text{P} + \text{Mn}) \quad (20)$$

$$\text{Fe (H}_2\text{)} = \text{H}_2 \text{ (entrada)} - \text{H}_2 \text{ (saída)} \cdot \frac{(2 \cdot 55,84)}{(3 \times 22,4)} \quad (21)$$

$$\text{H}_2 \text{ (entrada)} = \text{VS} \cdot \text{IV} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{22,4}{18} \quad (22)$$

$$\text{H}_2 \text{ (saída)} = \text{VS} \cdot \left(\frac{\text{N}_2(\text{VS})}{\text{N}_2(\text{Topo})} \right) \cdot \frac{\text{H}_2 \text{ (Topo)}}{100} \quad (23)$$

Na equação (20), os termos C, Si, P e Mn referem-se aos percentuais de carbono, silício, fósforo e manganês presentes no ferro gusa.

▪ **H_{i4} = calor de formação da escória:**

O calor de formação da escória é obtido a partir da equação (24).

$$\text{H}_{i4} = \text{SR} \cdot \text{C}_{p(\text{escória})} \quad (24)$$

sendo:

SR = taxa de Produção de escória (kg de escória/tonelada de gusa)

C_{p(escória)} = 140 kcal/kg °C

Os valores da energia total de entrada (H_i), calculados a partir da metodologia estabelecida, para os dados operacionais do mês de julho de 2009, estão apresentados na Tabela 17. Tais resultados representam uma avaliação da condição da operação apenas com coque e carvão, isto é, sem a adição de pneus ou plásticos.

Tabela 17 – Energia de entrada do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão

Data de aquisição dos dados operacionais	H _{i1} - Calor gerado na Combustão do Carbono: do Coque e do Carvão injetado (10 ³ kcal/t gusa)	H _{i2} - Calor sensível do ar soprado (10 ³ kcal/t gusa)	H _{i3} - Calor gerado na redução indireta do Ferro pelo CO (10 ³ kcal/t gusa)	H _{i4} - Calor de formação da escória (10 ³ kcal/t gusa)	H _i - Energia Total de entrada (10 ³ kcal/t gusa)
01/07/2009	678,86	371,28	66,99	20,31	1137,44
02/07/2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
03/07/2009	1075,99	574,65	-69,82	42,40	1623,22
04/07/2009	892,07	488,17	-79,54	43,51	1344,21
05/07/2009	685,05	380,98	2,56	48,72	1117,31
06/07/2009	676,26	392,22	5,24	35,32	1109,04
07/07/2009	637,84	373,42	13,54	35,03	1059,83
08/07/2009	623,39	374,39	17,64	34,27	1049,69
09/07/2009	624,59	373,11	16,54	32,64	1046,89
10/07/2009	617,42	376,04	19,63	32,11	1045,19
11/07/2009	618,81	376,33	18,45	32,76	1046,35
12/07/2009	623,64	379,73	17,11	32,70	1053,18
13/07/2009	625,85	377,78	15,22	33,77	1052,63
14/07/2009	620,22	374,54	14,74	34,26	1043,75
15/07/2009	623,93	378,70	17,10	35,66	1055,40
16/07/2009	624,85	377,35	15,15	36,56	1053,91
17/07/2009	616,02	375,40	17,75	35,29	1044,45
18/07/2009	614,02	375,19	18,82	34,37	1042,40
19/07/2009	620,44	382,44	19,87	33,68	1056,44
20/07/2009	614,20	374,54	19,50	33,14	1041,38
21/07/2009	619,46	377,86	18,64	33,14	1049,10
22/07/2009	613,76	374,09	18,33	33,44	1039,62
23/07/2009	607,63	373,74	21,50	34,36	1037,23
24/07/2009	623,21	370,33	15,42	34,40	1043,37
25/07/2009	617,54	373,20	18,84	33,67	1043,24
26/07/2009	615,78	375,45	17,56	33,18	1041,97
27/07/2009	608,66	371,87	18,57	32,97	1032,06
28/07/2009	600,44	365,60	17,41	32,89	1016,35
29/07/2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30/07/2009	645,20	357,27	20,39	33,21	1056,06
31/07/2009	605,87	374,92	23,39	33,95	1038,14

- Cálculo da energia de saída (H_o)

- H_{o1} = calor da reação *solution loss*:

O calor de reação *solution loss* é obtido a partir da equação (25).

$$H_{o1} = C_{sol} \cdot 3230 \quad (25)$$

A parcela C_{sol} representa o carbono que participa na reação solution loss. A parcela C_{gas} representa a parcela de carbono disponível para se transformar na forma gasosa. A parcela C_{in} representa todo o carbono que entra no Alto Forno. A parcela C_{ot} representa a parcela de carbono consumida pelo oxigênio formando o agente redutor - CO. A parcela C_{si} representa o carbono consumido nas reações com o silício, manganês e fósforo e pode ser calculada pelas equações (26) a (30).

$$C_{sol} = C_{gás} - (C_{ot} + C_{si}) \quad (26)$$

$$C_{gás} = C_{in} - 10 \cdot C_{(gusa)} \quad (27)$$

$$C_{in} = CR \cdot C_{coque} + PCR \cdot C_{carvão} - m_{pó} \cdot C_{pó} \cdot 2,0 \quad (28)$$

$$C_{ot} = C_{ot} \cdot PCR + C_{ot} \cdot CR \quad (29)$$

$$C_{si} = 8,551 \cdot Si_{(gusa)} + 2,185 \cdot Mn_{(gusa)} + 9,687 \cdot P_{(gusa)} \quad (30)$$

sendo:

CR = coke ratio (kg / t gusa)

PCR = Taxa de injeção de carvão (kg / t gusa)

$m_{pó}$ = massa de pó (kg / t gusa)

$C_{pó}$ = carbono contido no pó (%)

C_{coque} = Carbono contido no coque

$C_{carvão}$ = Carbono contido no carvão

▪ **H_{o2} = calor da redução do hidrogênio:**

O calor de redução do hidrogênio é obtido a partir da equação (31).

$$H_{o2} = Fe(H_2) \cdot 205 \quad (31)$$

sendo:

$$Fe(H_2) = (H_{2(entrada)} - H_{2(saída)}) \cdot \frac{(2 \times 55,84)}{(3 \times 22,4)} \quad (32)$$

$$H_{2(entrada)} = VS \cdot IV \cdot 10^{-3} \frac{22,4}{18} \quad (33)$$

$$H_{2(saída)} = VS \cdot \left(\frac{N_{2(VS)}}{N_{2(Topo)}} \right) \cdot \left(\frac{H_{2(Topo)}}{100} \right) \quad (34)$$

▪ **Ho₃ = calor sensível do gás BFG:**

O calor sensível do gás BFG é obtido a partir da equação (35).

$$H_{o3} = \dot{m}_{\text{sopro}} \cdot \frac{N_{2 \text{ sopro}}}{N_{2 \text{ gás BFG}}} \cdot T_{\text{gás BFG}} \cdot 10^{-2} \cdot (CO_{\text{gás}} \cdot 0,312 + CO_{2, \text{gás}} \cdot 0,412 + N_{2, \text{gás}} \cdot 0,311 + H_{2, \text{gás}} \cdot 0,307) \quad (35)$$

Ho₄ = calor sensível do gusa e da escória:

O calor sensível do ferro gusa e da escória é obtido a partir da equação (36).

$$H_{o4} = \text{gusa rate} \cdot [(300 + 0,205) \cdot T_{\text{gusa}} - 1400] + \text{escória rate} \cdot [(400 + 0,288) \cdot T_{\text{gusa}} - 1400] \quad (36)$$

▪ **Ho₅ = calor de redução pelo carbono do silício, manganês e fósforo:**

O calor de redução é obtido a partir da equação (37).

$$H_{o5} = [7460 \cdot (\text{Si}) + 1680 \cdot (\text{Mn}) + 5810 \cdot (\text{P})] \cdot 10 \quad (37)$$

▪ **Ho₆ = calor de decomposição do vapor (presente no ar de sopro):**

O calor de decomposição do vapor do ar de sopro é obtido a partir da equação (38).

$$H_{o6} = V_{\text{sopro}} \cdot \varphi_{\text{sopro}} \cdot 10^{-3} \cdot 3191 \quad (38)$$

sendo:

V_{sopro} = volume de sopro (Nm³/t de gusa)

φ_{sopro} = umidade de sopro (g/ Nm³)

▪ **Ho₇ = calor de evaporação da água (do coque, minério):**

O calor de evaporação da água é obtido a partir da equação (39).

$$H_{o7} = (\text{coque rate} \cdot \varphi_{\text{coque}} + \text{minério rate} \cdot \varphi_{\text{minério}} + \text{sinter rate} \cdot \varphi_{\text{sinter}} + \text{sucata} \cdot \varphi_{\text{sucata}}) \cdot 615 \quad (39)$$

No sinter consideram-se as parcelas: direta, pátio, *small sinter* e pelota; em sucatas, considera-se aço e gusa. Na Tabela 18 são apresentados o resultado do cálculo da energia de saída do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão, calculados a partir da metodologia estabelecida, para os dados operacionais do mês de julho de 2009. A energia perdida (H_I) é obtida por diferença, através da equação (10). A Tabela 19 e a Figura 33 apresentam os valores consolidados para os três blocos de energia analisados.

Tabela 18 – Energia de saída do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão

Data	H ₀₁ - calor da reação <i>sol. loss</i> (10 ³ kcal/t gusa)	H ₀₂ - calor da redução do H ₂ (10 ³ kcal/t gusa)	H ₀₃ - calor do gás do topo (10 ³ kcal/t gusa)	H ₀₄ - calor do gusa e escória (10 ³ kcal/t gusa)	H ₀₅ - calor de redução Si/MnP (10 ³ kcal/t gusa)	H ₀₆ - calor de decomp. vapor (10 ³ kcal/t gusa)	H ₀₇ - calor de vaporiz. da água (10 ³ kcal/t gusa)	H ₀ - energia total de saída (10 ³ kcal/t gusa)
01/07/2009	-229,43	5,08	54,03	389,20	34,41	76,53	25,85	355,66
02/07/2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
03/07/2009	405,57	21,06	82,97	439,31	102,33	316,09	61,01	1428,35
04/07/2009	310,51	24,50	87,88	457,37	82,64	367,73	57,81	1388,45
05/07/2009	227,51	8,04	78,89	480,41	56,26	120,70	50,02	1021,83
06/07/2009	237,08	8,27	69,68	439,91	42,01	124,18	48,24	969,37
07/07/2009	257,45	6,97	57,54	434,29	33,29	104,72	47,69	941,95
08/07/2009	202,55	6,10	52,90	432,29	28,54	91,67	47,37	861,43
09/07/2009	167,87	6,09	56,03	424,03	29,27	91,44	47,30	822,02
10/07/2009	216,43	5,38	48,49	417,66	22,92	80,79	47,18	838,86
11/07/2009	280,13	5,53	53,08	424,93	30,01	83,17	46,86	923,71
12/07/2009	235,12	5,62	64,35	420,48	25,39	84,52	47,60	883,09
13/07/2009	236,41	6,15	62,74	427,75	27,44	92,36	46,96	899,80
14/07/2009	238,97	5,95	60,19	427,32	23,43	89,41	47,03	892,30
15/07/2009	287,06	5,83	61,56	433,30	23,30	87,61	47,30	945,97
16/07/2009	227,85	6,13	61,59	438,60	31,58	92,10	47,27	905,12
17/07/2009	244,12	5,44	55,61	429,20	26,98	81,72	47,48	890,55
18/07/2009	272,99	5,25	53,32	427,69	25,14	78,89	47,32	910,59
19/07/2009	319,29	4,83	62,08	421,46	22,48	72,53	48,04	950,70
20/07/2009	278,90	5,35	61,55	424,47	26,07	80,37	46,98	923,69
21/07/2009	180,60	5,57	64,77	422,69	25,10	83,67	46,90	829,31
22/07/2009	268,54	5,53	60,19	423,24	25,47	83,18	46,96	913,12
23/07/2009	278,36	4,78	58,64	426,81	28,40	71,87	46,80	915,66
24/07/2009	240,61	6,24	56,39	429,10	32,14	93,78	47,19	905,46
25/07/2009	251,38	5,66	52,76	427,13	27,56	85,07	47,11	896,66
26/07/2009	241,65	5,47	52,09	423,96	27,41	82,20	47,02	879,80
27/07/2009	248,52	5,22	56,15	424,83	30,44	78,46	46,95	890,56
28/07/2009	262,23	5,04	48,10	421,34	25,36	75,71	47,22	885,00
29/07/2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30/07/2009	189,34	5,83	60,29	415,33	29,16	87,57	47,42	834,93
31/07/2009	233,86	4,65	63,10	425,75	28,58	69,93	45,98	871,85

Tabela 19 – Balanço de energia do Alto Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão

Data de aquisição dos dados operacionais	H_i - Energia Total de entrada (10 ³ kcal/t gusa)	H_o - Energia Total de saída (10 ³ kcal/t gusa)	H_i - Energia Perdida (10 ³ kcal/t gusa)	H_i / H_i
01/07/2009	1137,44	355,66	781,77	0,687
02/07/2009	0,00	0,00	0,00	0,000
03/07/2009	1623,22	1428,35	194,87	0,120
04/07/2009	1344,21	1388,45	-44,24	-0,033
05/07/2009	1117,31	1021,83	95,48	0,085
06/07/2009	1109,04	969,37	139,68	0,126
07/07/2009	1059,83	941,95	117,88	0,111
08/07/2009	1049,69	861,43	188,27	0,179
09/07/2009	1046,89	822,02	224,86	0,215
10/07/2009	1045,19	838,86	206,33	0,197
11/07/2009	1046,35	923,71	122,64	0,117
12/07/2009	1053,18	883,09	170,09	0,162
13/07/2009	1052,63	899,80	152,83	0,145
14/07/2009	1043,75	892,30	151,45	0,145
15/07/2009	1055,40	945,97	109,43	0,104
16/07/2009	1053,91	905,12	148,79	0,141
17/07/2009	1044,45	890,55	153,91	0,147
18/07/2009	1042,40	910,59	131,80	0,126
19/07/2009	1056,44	950,70	105,73	0,100
20/07/2009	1041,38	923,69	117,69	0,113
21/07/2009	1049,10	829,31	219,79	0,210
22/07/2009	1039,62	913,12	126,50	0,122
23/07/2009	1037,23	915,66	121,56	0,117
24/07/2009	1043,37	905,46	137,91	0,132
25/07/2009	1043,24	896,66	146,57	0,140
26/07/2009	1041,97	879,80	162,17	0,156
27/07/2009	1032,06	890,56	141,51	0,137
28/07/2009	1016,35	885,00	131,34	0,129
29/07/2009	0,00	0,00	0,00	0,000
30/07/2009	1056,06	834,93	221,13	0,209
31/07/2009	1038,14	871,85	166,29	0,160

Figura 33 – Gráfico do balanço de energia do Alto Forno 1

Considerando-se apenas o período de estabilidade operacional, observa-se da Tabela 19 que há uma variação das perdas (parcela H_I) em relação à energia de entrada (H_i) entre 9% e 21%; recorda-se que, no estabelecimento da metodologia, as “perdas” correspondem a parcelas térmicas não aproveitadas no processo de conversão de energia do Alto Forno, mas que, no entanto, podem representar aporte energético em outros processos com potencial relevância em termos de eficiência energética.

Com base em tais resultados, dispõe-se de uma base consistente de informações para a realização de uma série de ensaios com substituição de parte do carvão e coque por pneus ou plástico, nas proporções analisadas como adequados à manutenção da qualidade do produto final; a partir dos resultados experimentais pode-se, com o emprego das parcelas de pneu e/ou plástico da equação (15), avaliar o aumento ou redução das perdas de energia no processo com substituição energética das fontes de energia de entrada do Alto Forno.

Para uma decisão acerca de futuros ensaios com os produtos alternativos considerados, é necessário realizar uma estimativa preliminar acerca da atratividade econômica da substituição energética aqui proposta, análise que será realizada no item a seguir.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A massa de injeção de plástico está estimada em 12 % em relação à massa de injeção de carvão pulverizado, conforme mostra a Tabela 15 do item 3.5.3. Este percentual é obtido em função da análise química final da mistura carvão + plástico e pode variar em função da composição química de cada componente da mistura. Com base nos dados operacionais de julho de 2009 do Alto Forno 1, a Tabela 20 apresenta o consumo estimado em t/dia de plástico + carvão.

Tabela 20 - Estimativa de consumo de carvão + plástico

Data	Carvão Total Realizado =100% (t/dia)	Carvão Estimado = 88% (t/dia)	Plástico Estimado =12% (t/dia)	Carvão + Plástico Estimado =100% (t/dia)
01/7/2009	0,00	0,00	0,00	0,00
02/7/2009	0,00	0,00	0,00	0,00
03/7/2009	79,00	69,52	9,48	79,00
04/7/2009	0,00	0,00	0,00	0,00
05/7/2009	349,00	307,12	41,88	349,00
06/7/2009	1107,00	974,16	132,84	1107,00
07/7/2009	1168,00	1027,84	140,16	1168,00
08/7/2009	1255,00	1104,40	150,60	1255,00
09/7/2009	1225,00	1078,00	147,00	1225,00
10/7/2009	1268,00	1115,84	152,16	1268,00
11/7/2009	1291,00	1136,08	154,92	1291,00
12/7/2009	1293,00	1137,84	155,16	1293,00
13/7/2009	1285,00	1130,80	154,20	1285,00
14/7/2009	1258,00	1107,04	150,96	1258,00
15/7/2009	1311,00	1153,68	157,32	1311,00
16/7/2009	1288,00	1133,44	154,56	1288,00
17/7/2009	1292,00	1136,96	155,04	1292,00
18/7/2009	1289,00	1134,32	154,68	1289,00
19/7/2009	1291,00	1136,08	154,92	1291,00
20/7/2009	1292,00	1136,96	155,04	1292,00
21/7/2009	1350,00	1188,00	162,00	1350,00
22/7/2009	1344,00	1182,72	161,28	1344,00
23/7/2009	1396,00	1228,48	167,52	1396,00
24/7/2009	1272,00	1119,36	152,64	1272,00
25/7/2009	1305,00	1148,40	156,60	1305,00
26/7/2009	1301,00	1144,88	156,12	1301,00
27/7/2009	1304,00	1147,52	156,48	1304,00
28/7/2009	1180,00	1038,4	141,60	1180,00
29/7/2009	0,00	0,00	0,00	0,00
30/7/2009	788,00	693,44	94,56	788,00
31/7/2009	1331,00	1171,28	159,72	1331,00

4.1 Características do plástico a ser injetado

A característica do plástico a ser injetado será o tipo granulado com tamanho de partícula entre 0,2 a 1,0 mm. Conforme mostra as Figuras 11 e 12 do item 2.2.5, nesta especificação a combustibilidade do plástico aproxima-se da do carvão pulverizado.

4.2 Custo do plástico a ser injetado

O custo da injeção de plástico depende da participação do plástico na composição final do material de injeção (carvão + plástico). Através do custo de cada material obtém-se a variação do custo final da mistura de carvão + plástico em relação ao uso exclusivo do carvão, conforme equação (40).

$$E = (C.PCI + P.PPI) - PCI \quad (40)$$

sendo:

E = Equivalência de custo

C = Fração de participação de carvão na mistura

P = Fração de participação de plástico na mistura

PCI = Custo do carvão injetado, US\$ / t

PPI = Custo do plástico injetado, US\$ / t

Com base nos dados atuais, os seguintes valores podem ser considerados razoáveis para uma boa estimativa da equivalência de custos:

- Custo do carvão (PCI) = US\$ 125/ t

- Custo do plástico (PPI) = US\$ 378/ t

- C = 0,88

- P = 0,12

Deste modo,

$$E = (0,88 \cdot 125 + 0,12 \cdot 378) - 125$$

$$E = + \text{US\$ } 30,36 / t$$

Este resultado mostra que a mistura composta por 88% de carvão e 12% de plástico resulta num acréscimo de custo de US\$ 30,36 / t em relação ao uso exclusivo do carvão.

4.3 Estimativa da taxa de injeção de pneu

A massa de injeção de pneu está estimada em 4 % em relação à massa de injeção de carvão pulverizado, conforme mostra a Tabela 16 do item 3.5.3. Este percentual é obtido em função da análise química final da mistura carvão + pneu e pode variar em função da composição química de cada componente da mistura. Com base nos dados operacionais de Julho de 2009 do Alto Forno 1, a Tabela 21 apresenta o consumo estimado em t/dia de pneu + carvão.

4.4 Características do pneu a ser injetado

A característica do pneu a ser injetado será o tipo moído com tamanho de partícula entre 0,074 e 0,104 mm. Conforme apresentado nas Tabelas 10 e 11 do item 2.3, nesta especificação a taxa de combustão do pneu aproxima-se da do carvão pulverizado.

4.5 Custo do pneu a ser injetado

O custo da injeção de pneu depende da participação do pneu na composição final do material de injeção (carvão + pneu). Através do custo de cada material, pode-se obter a variação do custo final da mistura de carvão + pneu em relação ao uso exclusivo do carvão, pelo emprego da equação (40), considerando-se neste caso P a fração da participação de pneu na mistura e PNI o custo do pneu injetado, US\$ / t.

Tabela 21 - Estimativa de consumo de carvão + pneu

Data	Carvão Total Realizado=100% (t/dia)	Carvão Estimado =96% (t/dia)	Pneu Estimado = 4% (t/dia)	Carvão + Pneu Estimado=100% (t/dia)
1/7/2009	0,00	0,00	0,00	0,00
2/7/2009	0,00	0,00	0,00	0,00
3/7/2009	79,00	75,84	03,16	79,00
4/7/2009	0,00	0,00	0,00	0,00
5/7/2009	349,00	335,04	13,96	349,00
6/7/2009	1107,00	1062,72	44,28	1107,00
7/7/2009	1168,00	1121,28	46,72	1168,00
8/7/2009	1255,00	1204,80	50,20	1255,00
9/7/2009	1225,00	1176,00	49,00	1225,00
10/7/2009	1268,00	1217,28	50,72	1268,00
11/7/2009	1291,00	1239,36	51,64	1291,00
12/7/2009	1293,00	1241,28	51,72	1293,00
13/7/2009	1285,00	1233,60	51,40	1285,00
14/7/2009	1258,00	1207,68	50,32	1258,00
15/7/2009	1311,00	1258,56	52,44	1311,00
16/7/2009	1288,00	1236,48	51,52	1288,00
17/7/2009	1292,00	1240,32	51,68	1292,00
18/7/2009	1289,00	1237,44	51,56	1289,00
19/7/2009	1291,00	1239,36	51,64	1291,00
20/7/2009	1292,00	1240,32	51,68	1292,00
21/7/2009	1350,00	1296,00	54,00	1350,00
22/7/2009	1344,00	1290,24	53,76	1344,00
23/7/2009	1396,00	1340,16	55,84	1396,00
24/7/2009	1272,00	1221,12	50,88	1272,00
25/7/2009	1305,00	1252,80	52,20	1305,00
26/7/2009	1301,00	1248,96	52,04	1301,00
27/7/2009	1304,00	1251,84	52,16	1304,00
28/7/2009	1180,00	1132,80	47,20	1180,00
29/7/2009	0,00	0,00	0,00	0,00
30/7/2009	788,00	756,48	31,52	788,00
31/7/2009	1331,00	1277,76	53,24	1331,00

Com base nos dados atuais, os seguintes valores podem ser considerados razoáveis para uma boa estimativa da equivalência de custos:

Custo do carvão (PCI)= US\$ 125/ t

Custo do pneu (PNI)= US\$ 20/ t

C = 0,96

$$P = 0,04$$

$$E = (0,96 \times 125 + 0,04 \times 20) - 125$$

$$E = - \text{US\$ } 4,20 / \text{ t}$$

Neste caso, observa-se que a mistura composta por 96% de carvão e 4% de pneu resulta numa redução de custo de US\$ 4,20 / t em relação ao uso exclusivo do carvão.

4.6 Avaliação de resultados

Conforme mostra o balanço de massa, o uso de plástico e pneu é possível quando adicionado na mistura de carvão pulverizado. A participação do plástico e do pneu ocorre de forma exclusiva, ou seja, carvão + plástico ou carvão + pneu.

A participação de cada material é calculada de forma a manter a composição química final da mistura equivalente quando do uso exclusivo do carvão; para que esta condição seja alcançada, para a composição química estabelecida neste estudo:

Com uso do plástico: 88% de carvão + 12% de plástico

Com uso do pneu: 96% de carvão + 4% de pneu

Com base na configuração do balanço de energia real do Alto Forno 1, o efeito da injeção do plástico ou pneu poderá ser avaliado através da obtenção do novo balanço de energia decorrente das novas entradas e saídas, conforme o caso. Este balanço fornece uma avaliação qualitativa do desempenho operacional do Alto Forno com o uso do plástico ou pneu.

A utilização do plástico na proporção de 12% eleva o custo da mistura (carvão + plástico) em US\$ 30,36 / t, tornando-se inviável do ponto de vista econômico. Entretanto, há possibilidade de redução deste custo através de acordos ou incentivos governamentais e que não foram avaliados neste trabalho.

A utilização do pneu na proporção de 4% reduz o custo da mistura (carvão + pneu) em US\$ 4,20 / t, sinalizando a viabilidade desta substituição do ponto de vista econômico.

5 CONCLUSÕES

A utilização de plástico ou pneu como material de injeção no Alto Forno contribui para o processo de redução do minério de ferro em ferro gusa, devido ao fato de os mesmos conterem em suas composições químicas carbono e hidrogênio.

A proporção de plástico na mistura com carvão pulverizado deve ser de 12% para manter o equilíbrio da composição química final da mistura. Deve ser do tipo granulado com tamanho de partícula entre 0,2 e 1,0 mm. Nesta especificação, a combustibilidade do plástico aproxima-se da do carvão pulverizado. Observou-se, na análise de estimativa de custos realizada, que a mistura de plástico + carvão eleva o custo total da mistura em US\$ 30,36 / t em relação ao custo do uso exclusivo de carvão.

A proporção de pneu na mistura com carvão pulverizado deve ser de 4% para manter o equilíbrio da composição química final da mistura. Deve ser do tipo moído com tamanho de partícula entre 0,074 e 0,104 mm. Nesta especificação, a taxa de combustão do pneu aproxima-se da do carvão pulverizado. A mistura de pneu + carvão reduz o custo total da mistura em US\$ 4,20 / t em relação ao custo do uso exclusivo de carvão.

As análises realizadas indicam um potencial uso do pneu em associação com carvão em altos fornos, mantendo-se a qualidade atual do produto final obtido nesse processo. Há que se observar que existe legislação federal que regulamenta que fabricantes de pneus dêem destinação final ambientalmente adequada aos mesmos, ao cabo de sua utilização (Resolução CONAMA 416, de 30/09/2009, que substitui a Resolução CONAMA nº 258, de 26 de agosto de 1999), fato positivo do ponto de vista de tal aplicação.

Tal como ocorre com outros produtos alternativos, o setor siderúrgico deve enfrentar dificuldades na substituição, em especial pela concorrência com o setor cimenteiro. A este respeito, a Resolução CONAMA 264, de 26/08/1999 estabelece procedimentos, critérios e aspectos técnicos específicos de licenciamento ambiental para o co-processamento de resíduos em fornos rotativos de clínquer, para a fabricação de cimento, prática que tem sido utilizada com regularidade por este setor desde então.

Sugere-se que alguns estudos possam ser realizados a título de continuidade da presente análise:

- aplicação, em escala experimental, da injeção de pneu no alto Forno 1, na proporção sugerida nas análises realizadas (mantida a qualidade do produto final), visando estabelecer uma base comparativa em termos da melhoria ou não da eficiência energética do equipamento;
- análise das perdas levando em conta a avaliação exergética do Alto Forno1, visando identificar potenciais melhorias de projeto ou “retrofit” do equipamento;
- comparação metodológica de diferentes abordagens empregadas por fabricantes de altos fornos com relação à modelagem do balanço de energia em tais componentes térmicos.

REFERÊNCIAS

ASUNAMA, M. et al. Development of waste plastics injection process in blast furnace. **ISIJ International**, v.40, p. 244–251, 2000.

CHU, M.; NOGAMI, H.; YAGI, J. Numerical analysis on injection of hydrogen bearing materials into blast furnace. **ISIJ International**, v.44, p. 801–808, 2004.

ASSIS, P.S. (Coord.) **Injeção de materiais pulverizados em altos fornos**. Associação brasileira de metalurgia e materiais, São Paulo, 1993.

ERTEM, M.E.; GÜRGEN, S. Energy balance analysis for Erdemir blast furnace number one. **Applied Thermal Engineering**, v.26, p. 1139–1148, 2006.

Fonte=Ambientebrasil.Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/reciclagem/reciclagem_de_plastico.html> acesso em: 21/05/2009.

GUPTA, S.; SAHAJWALLA, V.; WOOD, J. Simultaneous combustion of waste plastics with coal for pulverized coal injection application. **Energy fuels**, v.20, p. 2557–2563, 2006.

KIM, D. et al. Waste plastics as supplemental fuel in the blast furnace process: improving combustion efficiencies. **Journal of hazardous materials**, v.B94, p. 213–222, 2002.

LAGARINHOS, C.A.F.; TENORIO, J.A.S. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v.18, p. 106–118, 2008.

MONTEIRO, L.P.C.; MAINER, F.B. Queima de pneus inservíveis em fornos de clínquer. **Engevista**, v.10, p. 52–58, 2008.

NOGAMI, H.; YAMAOKA, H.; TAKATANI, K. Raceway design for the innovative blast furnace. **ISIJ International**, v.44, p. 2150–2158, 2004.

NOZDRACHEV, V.A. et al. Development of the technology of injection of liquid and gaseous fuels into blast furnaces (analysis of world practice in the period 1993-1997). **Metallurgist**, v.42, p. 343–348, 1998.

OGAKI, Y. et al. Recycling of waste plastic packing in a blast furnace system. **NKK Technical review**, v.84, p. 01–07, 2001.

OLIVEIRA, G.M.; OLIVEIRA, V.A.; CADIDO, L.S.; ASSIS, P.S. Estudo do fluxo de materiais pulverizados em simulador de injeção de ventaneiras de altos-fornos através de vídeo-fotografia. **Tecnologia em metalurgia e materiais**, v.3, p. 07–15, 2007.

RESOLUÇÃO CONAMA 258, de 26/08/1999 -

RESOLUÇÃO CONAMA 264, de 26/08/1999 - Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos.

RESOLUÇÃO CONAMA 416, de 30/09/2009 - Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências.

SERRA, N.; LEITE, C.A.G. Gestão ambiental de pneus inservíveis no Brasil: identificação de fluxos e contribuição para políticas públicas de destinação. **Instituto de pesquisas tecnológicas - IPT**, 2004.

SILVA, A.M. **Estudo da combustão dos carvões e misturas com coque verde de petróleo injetadas em altos fornos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

SONTAG, R.E; WYLEN, G.J; BORGNAGE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. Editora Edgard Blücher, 2003.

ANEXO 1
DASDOS OPERACIONAIS DO ALTO FORNO 1 DA ARCELORMITTAL TUBARAO
Período de aquisição: 01 a 31 de Julho de 2009

Tabela A1 - Entradas 1

Data	Minério (t)	Sinter Direto (t)	Sinter do Pátio (t)	Pelota (t)	Sucata de Aço (t)	Sucata de Gusa (t)	Small Sinter (t)	Quartzo (t)	Coque CDQ (t)	Small Coque (t)	Carvão PCI (t)
01/7/2009	133,70	1008,34	0,00	613,80	26,39			34,94	644,63	51,11	0,00
02/7/2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
03/7/2009	249,15	2141,00	0,00	1151,10		0,00	0,0	27,00	1214,60	90,00	79,00
04/7/2009	786,50	4657,00	507,50	2945,00	0,00	0,00	0,0	52,51	2686,00	237,45	0,00
05/7/2009	669,70	4338,00	0,00	3073,00	70,65	0,00	0,0	35,37	1669,70	311,00	349,00
06/7/2009	1134,00	8030,00	0,00	5606,00	226,70	0,00	0,0	41,79	2826,20	572,20	1107,00
07/7/2009	1206,00	8510,00	0,00	5945,00	240,60	0,00	162,0	19,14	2905,30	615,50	1168,00
08/7/2009	1283,00	8518,00	0,00	5998,00	250,00	0,00	163,5	2,78	2911,60	638,20	1255,00
09/7/2009	1389,00	2857,00	5661,00	6050,00	247,50	0,00	165,0	2,22	2942,90	643,60	1225,00
10/7/2009	1392,00	0,00	8506,00	6049,00	247,50	0,00	165,0	0,00	2942,30	643,60	1268,00
11/7/2009	1378,60	6010,00	2410,00	5994,00	238,20	0,00	163,5	1,38	2914,70	637,65	1291,00
12/7/2009	1391,00	8439,00	0,00	6059,00	132,00	112,50	237,5	9,20	2942,00	642,80	1293,00
13/7/2009	1380,10	8274,00	0,00	6000,00	0,00	245,30	322,6	0,00	2915,10	637,40	1285,00
14/7/2009	1391,00	8277,00	0,00	6139,00	0,00	247,50	330,0	0,00	2942,30	643,60	1258,00
15/7/2009	1503,00	8594,00	0,00	5636,00	0,00	243,00	327,0	0,00	2907,20	635,70	1311,00
16/7/2009	1733,00	8783,00	483,00	4798,00	0,00	247,50	331,4	0,00	2893,10	638,80	1288,00
17/7/2009	1816,00	6906,60	2514,00	4711,00	0,00	247,50	330,6	0,00	2915,70	643,10	1292,00
18/7/2009	1812,00	7753,00	1279,00	5043,00	0,00	247,50	330,6	0,00	2913,50	643,40	1289,00
19/7/2009	1531,00	8095,00	0,00	5872,00	0,00	239,80	324,0	0,00	2862,30	631,80	1291,00
20/7/2009	1381,00	8099,00	0,00	6153,00	0,00	237,60	327,0	0,00	2889,80	637,65	1292,00
21/7/2009	1373,40	8095,00	0,00	6148,00	0,00	242,00	327,0	0,00	2876,10	637,80	1350,00
22/7/2009	1386,00	8163,00	0,00	6202,00	0,00	242,00	330,0	0,00	2887,50	643,60	1344,00
23/7/2009	1376,00	7543,00	552,30	6153,00	0,00	237,60	327,0	0,00	2902,50	645,40	1396,00
24/7/2009	1386,00	8171,00	0,00	6206,00	0,00	242,00	330,0	0,00	2960,10	643,20	1272,00
25/7/2009	1386,00	7595,00	579,20	6204,00	0,00	242,30	330,0	0,00	2941,80	644,50	1305,00
26/7/2009	1386,00	8167,50	0,00	6198,00	0,00	241,90	330,1	0,00	2936,40	643,20	1301,00
27/7/2009	1396,00	7594,00	635,50	6257,00	0,00	246,70	333,0	0,00	2939,70	649,35	1304,00
28/7/2009	1260,00	5643,00	1776,00	5635,00	0,00	220,00	300,0	0,00	2673,20	584,50	1180,00
29/7/2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
30/7/2009	1022,00	4719,00	694,30	4019,00	0,00	158,40	21,0	8,79	2012,80	427,68	788,00
31/7/2009	1690,00	8088,00	0,00	5822,00	0,00	242,10	283,5	0,00	2675,20	634,00	1331,00

Tabela A2 – Entradas 2

Data	Média Volume de Sopro (Nm ³ /min)	Média Umidade do Ar de Sopro (g/Nm ³)	Média Taxa de O ₂ (Nm ³ /h)	Média Temperatura do Ar de Sopro (°C)
01/7/2009	1639,1678	24,619371	3609,5916	1093,5242
02/7/2009	122,23456	17,373419	155,1492	898,82764
03/7/2009	2456,1687	30,565615	118,35482	927,94385
04/7/2009	4788,8184	61,839172	133,25195	1039,5441
05/7/2009	3757,0378	32,307674	3884,0332	1023,532
06/7/2009	6334,4795	41,34346	15723,155	1175,2003
07/7/2009	6318,8931	40,535534	17838,994	1206,4187
08/7/2009	6281,8735	36,991261	18725,416	1234,9995
09/7/2009	6326,8765	37,199261	19269,311	1235,806
10/7/2009	6328,0151	32,978817	19427,729	1247,5632
11/7/2009	6315,9048	33,863117	19384,086	1246,9462
12/7/2009	6333,9849	33,895863	19445,332	1248,7382
13/7/2009	6328,9663	37,394703	19429,707	1248,3048
14/7/2009	6326,2188	36,845272	19420,279	1248,5181
15/7/2009	6324,1714	35,269615	19411,613	1247,7208
16/7/2009	6320,7891	37,388268	19394,264	1248,4969
17/7/2009	6315,8892	33,521839	19389,359	1248,5359
18/7/2009	6312,9907	32,408154	19378,467	1248,781
19/7/2009	6198,6367	28,607203	19021,074	1247,2446
20/7/2009	6260,5146	33,054867	19208,244	1247,3296
21/7/2009	6316,8628	33,834686	19383,234	1247,7438
22/7/2009	6295,1011	34,310738	19271,412	1247,6523
23/7/2009	6299,1772	29,459589	19296,928	1242,5157
24/7/2009	6308,769	38,463055	19309,494	1231,5983
25/7/2009	6317,8071	34,866714	19335,877	1240,7036
26/7/2009	6320,1392	33,719471	19349,447	1248,719
27/7/2009	6317,728	32,790649	19341,918	1248,401
28/7/2009	5605,834	32,337841	17102,881	1240,7782
29/7/2009	121,57061	18,393148	148,95264	979,22211
30/7/2009	4567,1475	29,228762	10107,595	1071,8209
31/7/2009	6299,2866	28,797125	19141,699	1249,3993

Tabela A3 - Saídas

Data	Gusa (t)	Escória (t)	Produção BFG (x 10 ³ Nm ³)	H ₂ (%)	N ₂ (%)	CO (%)	CO ₂ (%)	Carvão PCI (t)	Pó do coletor (t)	Temperatura Gás do topo (°C)
01/7/2009	2391,50	347,00	3632,21	4,10	27,80	8,50	6,60	362,07	0,00	126,10
02/7/2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	52,62
03/7/2009	1964,70	595,00	5094,99	3,10	70,00	17,40	9,50	605,15	0,00	127,37
04/7/2009	5051,50	1570,00	10470,20	3,80	54,30	22,10	19,80	765,08	0,00	133,65
05/7/2009	5000,0	1740,00	7733,90	3,60	52,70	22,40	21,40	769,00	0,00	146,05
06/7/2009	9401,80	2372,00	14198,30	4,10	49,70	23,60	22,60	818,09	0,00	135,32
07/7/2009	10112,60	2530,00	14263,90	4,40	48,80	23,30	23,50	816,74	0,00	117,99
08/7/2009	10264,90	2513,00	14046,56	4,40	48,70	22,70	24,20	798,62	150,90	110,31
09/7/2009	10380,50	2420,00	14767,80	4,30	48,50	23,90	23,40	832,29	196,50	116,99
10/7/2009	10399,70	2385,00	14412,30	4,20	48,30	23,70	23,70	823,68	154,90	101,10
11/7/2009	10366,70	2426,00	14357,85	4,20	48,60	23,70	23,50	823,68	30,50	111,16
12/7/2009	10317,90	2410,00	14547,80	4,10	48,60	24,00	23,30	830,17	140,20	133,85
13/7/2009	10359,30	2499,00	14461,55	4,20	48,40	24,00	23,30	832,74	94,10	130,69
14/7/2009	10446,30	2556,00	14532,06	4,10	48,40	24,10	23,40	833,19	99,00	126,34
15/7/2009	10321,50	2629,00	14351,74	4,20	48,50	24,00	23,30	832,74	29,50	128,02
16/7/2009	10359,40	2705,00	14304,12	4,20	48,50	24,20	23,10	838,78	97,20	128,69
17/7/2009	10405,60	2623,00	14360,30	4,10	48,50	24,20	23,10	836,21	103,20	116,91
18/7/2009	10408,50	2555,00	14311,75	4,10	48,50	24,20	23,30	836,21	58,40	111,90
19/7/2009	10014,00	2409,00	14059,88	3,90	48,50	24,30	23,30	834,09	32,20	127,79
20/7/2009	10328,00	2445,00	14228,65	4,20	48,40	24,00	23,40	832,74	53,70	129,07
21/7/2009	10332,70	2446,00	14435,93	4,20	48,40	24,20	23,20	838,78	241,90	134,76
22/7/2009	10400,10	2484,00	14389,68	4,20	48,40	24,00	23,40	832,74	82,20	126,41
23/7/2009	10373,90	2546,00	14365,55	4,10	48,60	23,80	23,50	824,13	109,00	123,23
24/7/2009	10393,10	2554,00	14402,45	4,30	48,50	23,50	23,70	820,21	100,90	118,23
25/7/2009	10404,40	2502,00	14404,60	4,30	48,50	23,50	23,80	820,21	107,00	110,45
26/7/2009	10412,70	2468,00	14290,67	4,10	48,50	23,40	24,00	812,05	127,50	109,11
27/7/2009	10506,30	2474,00	14306,89	4,10	48,50	23,50	23,90	815,07	105,40	118,77
28/7/2009	9424,30	2214,00	12760,13	4,10	50,30	22,50	23,10	784,87	112,50	106,92
29/7/2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	82,49
30/7/2009	6787,30	1610,00	9735,00	4,20	50,07	22,70	23,07	793,48	118,20	117,91
31/7/2009	10398,60	2522,00	14079,07	4,20	48,60	23,60	23,60	820,66	0,00	132,86

Tabela A4 – Análise gusa e escória

Data	Temperatura do Gusa (°C)	Ti Gusa (%)	[C] (%)	[Si] (%)	[Mn] (%)	[P] (%)	[S] (%)
01/7/2009	1526,250	0,02704492	5,0306087	0,27926436	0,51397151	0,08507707	0,018008947
02/7/2009	0,000	0	0	0	0	0	0
03/7/2009	1462,200	0,064017877	4,7436528	1,1643689	0,53517586	0,11140684	0,0133394637
04/7/2009	1512,222	0,054615784	4,8487625	0,92830032	0,48819214	0,089246616	0,023821473
05/7/2009	1535,000	0,044437923	5,0621958	0,5829367	0,48714957	0,078950152	0,014499123
06/7/2009	1540,445	0,032858901	5,1269884	0,38245913	0,51245964	0,083745092	0,01827337
07/7/2009	1523,500	0,026303673	5,0629172	0,27489889	0,49184668	0,077754959	0,014736935
08/7/2009	1524,727	0,022173183	5,1056423	0,2174198	0,46627668	0,077270135	0,013788863
09/7/2009	1513,100	0,020579295	5,0263128	0,23077598	0,44106346	0,080010176	0,017559031
10/7/2009	1495,667	0,015404471	4,8369913	0,15613437	0,405285	0,076788515	0,028577153
11/7/2009	1515,000	0,022499999	4,9475384	0,25772747	0,37804231	0,076218657	0,020917766
12/7/2009	1499,333	0,015450244	4,8439527	0,18510012	0,42111683	0,077542461	0,029689457
13/7/2009	1513,889	0,018971397	4,9940701	0,20551664	0,44053686	0,080981292	0,022405919
14/7/2009	1506,889	0,01413073	4,8796668	0,1521789	0,43907359	0,080944769	0,02529992
15/7/2009	1512,875	0,01302077	4,9199309	0,15556988	0,42843258	0,07733997	0,027071126
16/7/2009	1521,889	0,020017259	5,0488081	0,24939142	0,49371684	0,080594845	0,018479327
17/7/2009	1502,182	0,014617606	4,9470301	0,19342972	0,47978249	0,077296846	0,022687137
18/7/2009	1507,000	0,01604511	4,9247861	0,1785896	0,44292763	0,075260676	0,024662012
19/7/2009	1492,000	0,014345018	4,7109303	0,15259284	0,40930739	0,072652519	0,035087429
20/7/2009	1509,000	0,018392041	4,8756042	0,19463184	0,43286449	0,073661372	0,02557377
21/7/2009	1502,500	0,015330662	4,7558045	0,18766573	0,41649929	0,070687383	0,029464567
22/7/2009	1501,200	0,017061261	4,870924	0,19111195	0,42583251	0,069785863	0,024648912
23/7/2009	1503,889	0,017643789	4,9405117	0,22915098	0,42523158	0,071582295	0,023149939
24/7/2009	1511,700	0,020737682	5,075932	0,27413329	0,44219369	0,073311731	0,021223266
25/7/2009	1512,800	0,018247617	4,9734025	0,21453455	0,4357892	0,07285811	0,026028493
26/7/2009	1506,700	0,016752398	4,8807669	0,21682391	0,4177382	0,072546668	0,026697215
27/7/2009	1512,300	0,020436976	4,9261637	0,24596055	0,45099044	0,07762441	0,0201311
28/7/2009	1500,400	0,014786805	4,8113418	0,18825969	0,42278972	0,072453141	0,025659174
29/7/2010	0,000	0	0	0	0	0	0
30/7/2009	1474,800	0,021217372	4,6698856	0,24571109	0,39721298	0,071531668	0,033093695
31/7/2009	1504,556	0,016666668	4,7997627	0,23374847	0,41111034	0,072988182	0,035405401

Planilha A5 - Análise Química

Data	Sinter Direto		Coque CDQ		Carvão PCI				Pelota		Pelota		Sinter do pátio		Small sinter		Sucata		
	%	%T Fe	%C	%Cinza	%C	%H ₂	%S	%MV	%	%T Fe	%	%T Fe	FeO	%	%T Fe	%	T Fe	FeO	
01/7/2009	56,58	56,66	89,61	8,91	83,21	3,57	0,26	14,03	34,44	65,72	7,50	65,61		0,00	56,82	0,00	60,52	1,48	63,11
02/7/2009	0,00	56,81	89,61	8,98	83,21	3,57	0,26	14,03	0,00	65,72	0,00	65,61		0,00	57,31	0,00	60,52	0,00	63,11
03/7/2009	60,46	56,93	89,61	8,98	83,21	3,57	0,26	14,03	32,51	65,72	7,04	65,61		0,00	57,31	0,00	60,52	0,00	63,11
04/7/2009	52,35	57,02	89,61	8,66	83,21	3,57	0,26	14,03	33,10	65,72	8,84	65,61		5,70	56,87	0,00	60,52	0,00	63,11
05/7/2009	53,22	57,16	90	9,07	83,21	3,57	0,26	14,03	37,70	65,72	8,22	65,61		0,00	57,31	0,00	60,52	0,87	63,11
06/7/2009	53,55	56,90	88,51	9,15	83,21	3,57	0,26	14,03	37,38	65,72	7,56	65,61		0,00	57,31	0,00	60,52	1,51	63,11
07/7/2009	52,98	56,93	88,51	9,68	85,27	3,40	0,29	20,96	37,01	65,72	7,51	65,61		0,00	57,31	1,01	60,52	1,50	63,11
08/7/2009	52,54	56,86	88,51	9,84	85,27	3,40	0,29	20,96	37,00	65,72	7,91	65,61		0,00	57,31	1,01	60,52	1,54	63,11
09/7/2009	17,45	56,60	88,51	9,97	85,27	3,40	0,29	20,96	36,96	65,72	8,49	65,61		34,58	57,30	1,01	60,52	1,51	63,11
10/7/2009	0,00	0,00	88,51	10,52	85,27	3,40	0,29	20,96	36,98	65,72	8,51	65,61		51,99	57,30	1,01	60,52	1,51	63,11
11/7/2009	37,11	56,65	88,8	10,23	85,27	3,40	0,29	20,96	37,01	65,72	8,51	64,69		14,88	57,30	1,01	60,52	1,47	63,11
12/7/2009	51,55	56,83	88,98	10,41	85,27	3,40	0,29	20,96	37,01	65,72	8,50	64,69		0,00	57,30	1,45	60,52	1,49	63,11
13/7/2009	51,00	56,56	88,98	10,22	85,27	3,40	0,29	20,96	36,99	65,72	8,51	64,69		0,00	57,30	1,99	60,52	1,51	63,11
14/7/2009	50,52	56,70	88,98	10,27	85,27	3,40	0,29	20,96	37,47	65,72	8,49	64,69		0,00	57,30	2,01	60,52	1,51	63,11
15/7/2009	52,71	56,85	89	10,32	85,27	3,40	0,29	20,96	34,57	65,72	9,22	64,69		0,00	57,30	2,01	60,52	1,49	63,11
16/7/2009	53,63	56,83	89	10,22	85,27	3,40	0,29	20,96	29,30	65,72	10,58	64,69		2,95	57,30	2,02	60,52	1,51	63,11
17/7/2009	41,79	56,88	89	10,26	85,27	3,40	0,29	20,96	28,51	65,72	10,99	64,69		15,21	57,30	2,00	60,52	1,50	63,11
18/7/2009	47,09	56,97	89,15	10,39	85,27	3,40	0,29	20,96	30,63	65,72	11,01	65,67		7,77	57,30	2,01	60,52	1,50	63,11
19/7/2009	50,40	56,89	89,15	10,31	85,27	3,40	0,29	20,96	36,56	65,72	9,53	65,67		0,00	57,30	2,02	60,52	1,49	63,11
20/7/2009	50,00	56,71	89,15	10,48	85,27	3,40	0,29	20,96	37,99	65,72	8,53	65,67		0,00	57,30	2,02	60,52	1,47	63,11
21/7/2009	50,01	56,78	89,15	9,88	85,27	3,40	0,29	20,96	37,98	65,72	8,49	65,67		0,00	57,30	2,02	60,52	1,50	63,11
22/7/2009	50,01	56,65	89,15	10,18	85,27	3,40	0,29	20,96	38,00	65,72	8,49	65,67		0,00	57,30	2,02	60,52	1,48	63,11
23/7/2009	46,59	56,58	89,15	10,08	85,27	3,40	0,29	20,96	38,01	65,72	8,50	65,67		3,41	57,30	2,02	60,52	1,47	63,11
24/7/2009	50,02	56,65	89,15	10,2	85,27	3,40	0,29	20,96	37,99	65,72	8,48	65,45		0,00	57,30	2,02	60,52	1,48	63,11
25/7/2009	46,49	56,75	89,15	10,24	85,27	3,40	0,29	20,96	37,98	65,72	8,48	65,45		3,55	57,30	2,02	60,52	1,48	63,11
26/7/2009	50,04	56,85	89,15	10,29	85,27	3,40	0,29	20,96	37,97	65,72	8,49	65,45		0,00	57,30	2,02	60,52	1,48	63,11
27/7/2009	46,13	56,70	88,73	10,37	85,27	3,40	0,29	20,96	38,01	65,72	8,48	65,45		3,86	57,30	2,02	60,52	1,50	63,11
28/7/2009	38,04	56,67	90,1	10,37	80,23	4,91	0,74	27,78	37,99	65,72	8,49	65,45		11,97	57,30	2,02	60,52	1,48	63,11
29/7/2009	0,00	0,00	89,62	10,37	80,23	4,91	0,74	27,78	0,00	65,72	0,00	65,45		0,00	56,87	0,00	60,52	0,00	63,11
30/7/2009	44,38	56,75	89,62	10,37	80,23	4,91	0,74	27,78	37,79	65,72	9,61	65,61		6,53	56,87	0,20	60,52	1,49	63,11
31/7/2009	50,16	56,80	88,51	10,59	80,23	4,91	0,74	27,78	36,10	65,72	10,48	65,61		0,00	56,87	1,76	60,52	1,50	63,11