



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



Gemíron de Paula dos Reis

**“Influência da Composição do Bagaço de Cana e Carvão Vegetal
Injetado sobre Escória de Alto-Forno a Carvão Vegetal”**

Ouro Preto, Setembro de 2013.

Gemíron de Paula dos Reis

“Influência da Composição do Bagaço de Cana e Carvão Vegetal
Injetado sobre Escória de Alto-Forno a Carvão Vegetal”

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalurgista.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Co-orientador: M. Sc. Carlos Frederico Campos de Assis

Ouro Preto, Setembro de 2013.

R375i Reis, Gemírson de Paula dos.

Influência da composição do bagaço de cana e carvão vegetal

injetado sobre escória de alto-forno a carvão vegetal. [manuscrito]/

Gemírson de Paula dos Reis. – 2013.

xiii, 47f.: il., color., graf., tab.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Co-orientador: M. Sc. Carlos Frederico Campos de Assis

Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Ouro
Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Metalúrgica.

Área de concentração: Metalurgia.

Fonte de catalogação: bibem@sisbin.ufop.br



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Aos 12 dias do mês de setembro de 2013, às 09 horas, na sala 110, no prédio da Escola de Minas, Campus, foi realizada a defesa de monografia pelo aluno **Gemirson de Paula dos Reis** sendo a comissão examinadora constituída pelos professores Paulo Santos Assis (Orientador), Itavahn Alves da Silva e Tácia Costa Veloso. O aluno apresentou a monografia intitulada "**Influência da composição do bagaço de cana e carvão vegetal injetado sobre escória de alto-forno a carvão vegetal**". A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo ao aluno um prazo de 15 dias para incorporar, no texto final, as alterações sugeridas. Na forma regulamentar, lavrou-se a presente ata que vai devidamente assinada pelos membros da comissão e pelo aluno.

Ouro Preto, 12 de setembro de 2013.


Prof. Paulo Santos Assis
Orientador – Presidente


Prof. Itavahn Alves da Silva
Membro


Profª. Tácia Costa Veloso
Membro


Gemirson de Paula dos Reis
Aluno

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento aos meus pais que sempre me apoiaram com muito amor as minhas escolhas.

Aos meus amigos, que sempre presentes, colaboraram com momentos importantes de aprendizado e enfrentamento aos desafios de minha vida.

Agradeço ao Professor Dr. Paulo Santos Assis e ao M. Sc. Carlos Frederico Campos de Assis pela orientação, paciência e oportunidades incríveis de vida.

À Universidade Federal de Ouro Preto, que me proporcionou todo conhecimento e aprendizado por estes cinco anos de estudos e dedicação.

À Escola de Minas pelos ensinamentos em Engenharia Metalúrgica.

À empresa USIMINAS pelo auxílio na realização dos experimentos.

À Fundação Gorceix e Caint pelo apoio acadêmico.

A educação modela as
almas e recria os
corações. Ela é a alavanca
das mudanças sociais.

Paulo Freire

RESUMO

Os grandes avanços da siderurgia mundial possibilitaram a ampla utilização do aço em diversos setores da sociedade. O crescente uso desse material é observado no decorrer dos anos, e seu consumo *per capita* é um indicador de qualidade de vida e de desenvolvimento humano. No Brasil, as indústrias produtoras de aço possuem diversos estudos e inovações tecnológicas, dentre as quais, técnicas de injeção de carvões pulverizados (CP) pelas ventaneiras de altos-fornos tem sido de grande valia, uma vez que, estas tecnologias possibilitam uma economia quanto à utilização de combustíveis pelo topo dos altos-fornos e conseqüentemente menor custo de produção. Nesse trabalho, objetiva-se analisar os efeitos das composições de bagaço de cana- de- açúcar e carvão vegetal pulverizados nas propriedades das escórias de altos-fornos vinculados às ferramentas de injeção pelas ventaneiras dos altos- fornos, balanço mássico e taxa de substituição de carbono. Através destes métodos uma economia no redutor granulado de alto- forno e no aproveitamento dos resíduos gerados pela indústria propicia um desenvolvimento de processos sustentáveis.

Palavras chave: Bagaço de Cana, Carvão Vegetal, Injeção, Balanço de Massa, Escória de Alto- Forno.

ABSTRACT

The big development of steel making plants could allow the application of steel in several areas of our society. The increase of steel products is noted at last years and their per capita consumption is considered a quality of life level and human development. In Brazil, the steel plants have several studies about technological innovations such as injection technics of pulverized coal through tuyeres of blast furnace has been a good opportunity reduce the use of fuel on the blast furnace top and reduce costs. This work has an objective to analyze of pulverized sugarcane and charcoal composition which can influence several blast furnace slag properties associate with injection technology via tuyeres, mass balance and substitution rate of carbon. Through this methodology an economy of lump reducers of blast furnace and the use of industrial residues provide a sustainable development.

Keywords: Sugarcane bagasse, Charcoal, Injection, Mass Balance, Blast Furnace Slag.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Carvão vegetal.....	9
Figura 2: Temperatura de carbonização em função dos constituintes da madeira	9
Figura 3: Cana- de- açúcar.	13
Figura 4: Perfil da produção de cana- de- açúcar no Brasil e suas principais regiões produtoras de cana- de açúcar.	14
Figura 5: Bagaço de cana.....	15
Figura 6: Perfil das fontes energéticas das indústrias brasileiras	16
Figura 7: Sistema de injeção das ventaneiras e <i>raceway</i> do alto- forno.....	17
Figura 8: Equipamento para análise elementar.....	20
Figura 9: Esquema de funcionamento de uma bomba calorimétrica.....	22
Figura 10: Calorímetro para determinação de poder calorífico.....	22
Figura 11: Imagem do difratômetro de raios X	25
Figura 12: Simulador de Injeção de Materiais Pulverizados em alto-forno.....	26
Figura 13: Seções do simulador de elevado gradiente térmico.	27
Figura 14: Ampola utilizada para coletar o gás gerado no simulador de elevado gradiente térmico.....	30
Figura 15: Vista de um ORSAT do laboratório de Siderurgia, Escola de Minas-UFOP. ...	31
Figura 16: Diagrama quaternário de SiO ₂ , CaO, MgO e Al ₂ O ₃	37
Figura 17: Diagrama quaternário de SiO ₂ , CaO, MgO e Al ₂ O ₃	40
Figura 18: Diagrama quaternário de SiO ₂ , CaO, MgO e Al ₂ O ₃	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do gusa em altos- fornos a carvão vegetal	4
Tabela 2: Análise imediata do carvão vegetal e rendimento em carbono fixo.....	10
Tabela 3: Produção brasileira de cana, açúcar e álcool.	13
Tabela 4: Análise elementar do bagaço de cana e carvão vegetal.....	33
Tabela 5: Análise imediata do bagaço de cana e carvão vegetal.....	33
Tabela 6: Composição química da cinza de bagaço de cana e carvão vegetal.....	34
Tabela 7: Valores de poder calorífico superior e inferior do bagaço de cana e carvão vegetal.....	35
Tabela 8: Percentual de cada material presente na mistura e taxa de injeção correspondente.	36
Tabela 9: Análise da escória sem injeção de materiais pelas ventaneiras.	37
Tabela 10: Porcentagens em peso do bagaço da cana e do carvão vegetal.	38
Tabela 11: Percentuais de sílica, óxido de cálcio, óxido de magnésio e alumina.	39
Tabela 12: Contribuição dos óxidos na quantidade de massa dos injetados.	39
Tabela 13: Novo volume de escória obtido com a injeção da BC e CV.	39
Tabela 14: Valores percentuais de cada óxido em um volume de 163,50 kg/t gusa de escória.....	41

LISTA DE ABREVIações

CP - Carvões Pulverizados
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
MME - Ministério de Minas e Energia
Mtep - Milhões de Toneladas Equivalentes de Petróleo
BC - Bagaço de Cana
CV - Carvão Vegetal
AF - Alto- Forno
RG - Rendimento Gravimétrico em %
PMS - Peso da Madeira Seca em Kg
PC - Peso do Carvão em Kg
HGI - *Hardgrove Grindability Index*
ICP - Injeção de Carvões Pulverizados
DEMIN - Departamento de Engenharia de Minas
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
PCS - Poder Calorífico Superior
PCI – Poder Calorífico Inferior
TU - Teor de Umidade em %
 m_0 - Massa Inicial de Amostra, em g
 m_1 - Massa Final da Amostra em g
 m_2 - Massa Inicial do Cadinho + Amostra em g
 m_3 - Massa Final do Cadinho + Resíduo em g
 m - Massa da Amostra em g
Cf - Teor de Carbono Fixo em %
MV - Teor de Matérias Voláteis em %
CZ - Teor de Cinza em %
 n – Número Inteiro
 λ - Comprimento de Onda do Tubo do Aparelho
 θ - Ângulo de Incidência
 d - Espaçamento Interplanar
IC - Índice de Combustão

%CO - Porcentagem do Gás Produzido
%CO₂ - Porcentagem do Gás Produzido
%CH₄ - Porcentagem do Gás produzido
%Cf - Carbono Fixo Contido na amostra
n_g - Número de Mols do Gás depois da Experiência
m_a : Massa da Amostra de Carbono Injetado em Miligramas
FP - Forno de Pré- Aquecimento
FI - Forno Elétrico
P - Queda de Pressão Anterior a Pesagem do Volume no Circuito
R - Dispositivo de Resfriamento
F - Filtro
TS - Taxa de Substituição
%Cinza - Percentual de Cinza Contida no Material
%MV - Percentual de Matéria Volátil Contida no Material
μ - Viscosidade Dinâmica kg/m. s
T - Temperatura em Graus Kelvin (K)
%CaO, %MgO, %Al₂O₃ - Porcentagem em Peso dos Óxidos

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVOS GERAIS	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Alto- Forno	4
4 Carvão Vegetal	8
4.1 Caracterização do Carvão Vegetal	11
5 Cana- de- Açúcar	12
5.1 Plantio da Cana- de- Açúcar	14
6 Bagaço de Cana- de- Açúcar	15
7 Injeção de Combustíveis nos Altos- Fornos	16
7.1 Injeção de Carvão Pulverizado em Altos- Fornos	17
8 MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
8.1 Matérias- Primas.....	19
8.2 Caracterização das Matérias- Primas.....	19
8.2.1 Cominuição e Peneiramento	19
8.2.2 Análise Elementar.....	20
8.2.3 Determinação do Poder Calorífico	21
8.2.4 Análise Química Imediata	22
8.2.5 Caracterização da Cinza de Materiais com Difração de Raios X.....	24
8.3 Simulação da Injeção de Materiais Pulverizados pelas Ventaneiras dos Altos- Fornos	26
8.3.1 Simulador de Injeção de Materiais Pulverizados em Altos- Fornos	26
8.3.2 Funcionamento do Simulador de Elevado Gradiente Térmico	28

8.3.3 O ORSAT	30
9 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
9.1 Análise Química Elementar.....	32
9.2 Análise Química Imediata	33
9.3 Análises da Cinza	34
9.4 Poder Calorífico.....	35
9.5 Taxa de Substituição de Carbono	35
9.6 Taxa de Combustão e Percentual da Mistura de Materiais	36
9.7 Análises da Escória Sem Injeção de Materiais Pulverizados pelas Ventaneiras	36
9.8 Análises dos Materiais Injetados	38
9.9 Novo Volume de Escória.....	39
10 CONCLUSÕES.....	42
11 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico e o crescimento econômico, sem dúvida, trouxeram grandes benefícios à sociedade e um dos diversos setores que contribuem para este avanço é o siderúrgico.

De acordo com o Instituto Aço Brasil, em 2012, a produção brasileira de aço bruto alcançou 34,5 milhões de toneladas com um saldo comercial de \$ 2,5 bilhões de dólares (12,8 %). Situação que tende a melhorar ainda mais, nos próximos anos com o aumento da produção mundial (ABM, 2011). Associado a esse desenvolvimento, questões como, custos de operação e degradação do meio ambiente devem ser analisados.

Segundo estudos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2012) o consumo de combustíveis renováveis alcançou 120,1 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) correspondendo a 44,1%, de toda produção energética no país, valor este que supera a média mundial 13,3% em consumo de renováveis demonstrando assim, o grande potencial energético das matérias-primas brasileiras. Diante disso, estudos no setor metalúrgico são feitos com o intuito de reduzir as taxas de poluição, redução da utilização de matérias-primas não renováveis e de combustíveis fósseis pelo topo dos altos-fornos. O emprego de materiais alternativos, como o bagaço de cana (BC) e finos de carvão vegetal (CV) injetado pelas ventaneiras dos altos-fornos surge como importantes ferramentas nas reduções desses fatores de degradação ambiental.

Em 2011, o Brasil apresentou uma demanda de 88,4 Mtep, com utilização de 19,1% e 5% de BC e CV, respectivamente (EPE, 2012). Além disso, nota-se que esses combustíveis podem ser adicionados de forma individual ou misturados para aplicação nas ventaneiras, possibilitando a substituição de parte do carbono adicionado pelo topo dos altos-fornos, bem como alterando a composição química, temperatura *líquidus*, basicidade e viscosidade das escórias.

O ajuste de composição nas escórias será apresentado neste trabalho, como forma de permitir uma incorporação de BC e CV pelas ventaneiras do reator metalúrgico.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo desse estudo é avaliar a aplicabilidade de finos de bagaço de cana e carvão vegetal pelas ventaneiras dos altos-fornos e suas influências nas escórias dos altos-fornos, a fim de reduzir o consumo do carvão granulado bem como permitir menor impacto ambiental.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Fazer amostragens e caracterização de bagaço de cana e carvão vegetal;

Desenvolver correlações entre as variáveis do carvão vegetal, e bagaço de cana com os resultados advindos do comportamento da combustão frente às condições severas reinantes no alto-forno;

Fazer análise química elementar, imediata e balanço mássico dos materiais injetados e presentes na escória, buscando identificar suas alterações nas propriedades das escórias;

Determinar a composição dos principais óxidos, temperatura *líquidus*, basicidade e viscosidade das escórias associado às análises de cinza dos materiais injetados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Alto-Forno

Alto-forno (AF) é um reator que opera em fluxo contra corrente e produz o ferro-gusa (ferro primário) e escória em região inferior do alto – forno denominada cadinho, no qual são realizados furos de corrida permitindo que os líquidos sejam retirados de seu interior (UNISINOS, 2011).

Segundo (ARAÚJO, 1997), para uma produção de uma tonelada de ferro gusa, o carregamento típico de altos-fornos a carvão vegetal é constituído por: 1550 a 1685kg de minério de ferro, 3,2 a 3,75m³ de carvão, 40 a 115kg de calcário, 50 a 67kg de quartzito e 13 a 16kg de minério de manganês.

O gusa é o principal produto do alto- forno. Ele possui basicamente teores de Fe, C,P, S, Si e Mn, conforme a Tabela 1 de composição química típica do gusa de altos- fornos a carvão vegetal.

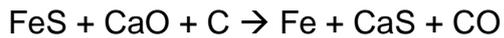
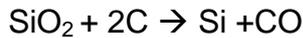
Tabela 1: Composição química do gusa em altos- fornos a carvão vegetal (ARAÚJO, 1997).

Elementos	Faixa de Composição (%)
Si	0,2-0,6
S	0,020- 0,1
P	0,020 - 0,12
Mn	0,3- 0,6
C	4 - 4,3
Fe	Restante

Em altos- fornos a carvão vegetal, a temperatura *líquidus* de vazamento compreende faixas de 1270°C a 1330° C. Esta temperatura de vazamento é mais baixa do que altos- fornos a coque. Além disso, nota-se teores de silício menor entre 0,3 e 0,4%.

Já os teores de Fe são influenciadas preferencialmente pela presença de CaO a altas temperaturas (ARAÚJO, 1997).

A obtenção do Si e Fe seguem as reações abaixo.

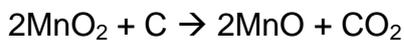


Os teores de Si (elemento desoxidante) na primeira reação é favorecida a altas temperaturas e desfavorecida a basicidades maiores, já a segunda reação é promovida mais facilmente em presença de CaO, onde o Ca se liga preferencialmente ao S levando-o para a escória (ARAÚJO, 1997).

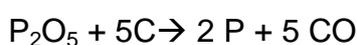
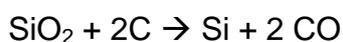
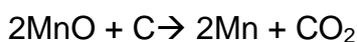
A escória é a porção volumétrica que possui compostos indesejáveis ao gusa, porém ele poderá ser destinado para produção de blocos, tijolos e concretos, por exemplo. Ela é formada pela reação química entre a ganga do minério de ferro, cinzas do carvão e fundentes, estes componentes reagem um com outro até que seja formada em sua maioria silicatos ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$; $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$; $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) e aluminatos ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, dentre outros).

A seguir serão apresentadas algumas reações presentes no AF para formação de escórias segundo (ROMEIRO, 1997).

Às temperaturas baixas na parte superior do alto forno tem-se:



Nas temperaturas elevadas tem-se:



Na última equação praticamente todo o P é direcionado ao gusa.

Reação da escória (escoriamento):



Uma maior presença de SiO_2 e Al_2O_3 na cinza indicam carácter mais ácidos nas escórias de AF e o incremento de alumina eleva a viscosidade da escória, que pode ser compensada com a redução do teor de sílica.

Os constituintes básicos (CaO , MgO) doadores de O^{2-} pela teoria iônica, reagem com constituintes ácidos dos carvões gerando a escória (ASSIS, 2008).

A presença em teores mais elevados de cal possibilita melhor dessulfuração, porém torna a escória menos fluida dificultando seu vazamento pelo furo de corrida. Com isso, a substituição da CaO pelo MgO torna a escória mais fluida contornando este problema operacional.

A maior parte de sua composição química provém óxidos (SiO_2 , CaO , MgO e Al_2O_3) e os demais constituintes são geralmente MnO , FeO , álcalis, estes, juntamente com o MgO , contribuem para o decréscimo da temperatura de fusão da escória. Os quatro óxidos principais constituem cerca de 95% do total de 150 a 200kg/ tonelada de gusa em volume de escória típica de um alto- forno a CV. Segundo (ABM, 1979), o primeiro volume citado de escória é indicado para aciaria, já o segundo para fundição.

Alguns fatores para um bom funcionamento do alto- forno a CV e suas interferências sobre a escória devem ser observados, como exemplo, basicidade, temperatura líquidas, viscosidade, quantidade de cinza, álcalis, teor de enxofre e de fósforo segundo (ABM,1979) tem-se:

- A basicidade usual nas indústrias para análise é dita basicidade binária ($\% \text{CaO} / \% \text{SiO}_2$) que consiste na relação entre constituintes básicos por constituintes ácidos e em AF a CV deve estar próximo de 0,8 com intuito de permitir uma

“marcha” mais lenta do AF possibilitando maior remoção do silício. Nota-se que, outras análises de basicidade podem ser feitas aumentando o número de óxidos na relação de proporção;

- Quanto mais ácidas as cinzas do redutor, menores serão os danos dos álcalis nos fornos e maior será a incorporação dos álcalis pela escória. Além disso, um volume maior de cinzas implica em aumento no volume de escória e decréscimo na produtividade. Segundo (HUTNY et al, 1996 citado por GOMES, 2004), 1kg de cinzas do carvão produz 1,5 a 1,86kg de escória;

- Os álcalis são reduzidos em sua grande parte em K e Na quando presentes na parte inferior do AF, que ascendem e reoxidam a formas sólidas que descem pela carga de topo. Concomitantemente, ao movimento circular dos álcalis gera acúmulo de dos compostos de potássio e sódio nos refratários e restringem o fluxo de gás da carga aumentando a reatividade (GOMES, 2004);

- A temperatura *líquidus* é obtida no diagrama de fases entre os óxidos presentes nas escórias. Por exemplo, uma composição possuindo 38% de CaO, 47% de SiO₂ e 15% de Al₂O₃ apresentam basicidade de 0,81 e menor ponto de fusão com 1165°C;

- A viscosidade é fator que afeta a “marcha” do AF. Nota-se que, valores elevados de viscosidades implicam em escoamento mais difícil, em menor espaço útil do cadinho e adesão ao carvão da rampa impedindo o fluxo de gases ascendentes no reator metalúrgico. Em AF a carvão vegetal, escórias ácidas (basicidade binária menor que 1) e baixas temperaturas podem elevar a viscosidade das escórias;

- Um elevado teor de enxofre aumenta o volume de escória e custos para dessulfuração reduzindo a produtividade. Segundo (ROMEIRO, 1997), o S tem preferência de ligação com o Fe. O FeS formado possui baixo ponto de fusão e irá se localizar nos contornos de grãos diminuindo a tenacidade do aço ou até mesmo desintegrá-lo pela ação da forja ou laminação. Para evitar danos pela presença do S no aço, o Mn (elemento dessulfurante e desoxidante) é adicionado formando o

composto MnS em detrimento ao FeS. Nota-se que o MnS resiste satisfatoriamente à conformação mecânica;

-O teor de fósforo deve ser controlado para que ele não cause fragilização a frio (baixa resistência ao choque à temperatura ambiente). O P dissolve na ferrita endurecendo-a e elevando o tamanho de grão (ROMEIRO, 1997).

4 Carvão Vegetal

No setor siderúrgico, o crescente aumento da demanda mundial por matérias-primas influenciadas em grande parte pela abertura econômica na China resultaram em aumento nos valores de compra de matérias-primas tais como: carvão mineral, coque e minérios. Dentre os diversos materiais, o carvão vegetal (CV) tendo sido uma das atuais apostas da siderurgia brasileira frente à utilização do carvão mineral (CM), que não é uma matéria-prima renovável. Além do mais, o CV é vantajoso quanto ao CM. O CV não possui enxofre (se não controlado o seu teor gera um aço quebradiço) em sua composição e seu plantio garante boa produtividade e em tempo curto de crescimento de árvores.

O território brasileiro dispõe de um espaço amplo para o plantio de eucalipto, principal fonte de madeira para obtenção do carvão vegetal por possuir densidade (ρ) maior se comparado com o tipo pinus (ASSIS, 2010) sendo os valores médios de ρ igual a $0,61\text{g/cm}^3$ (*eucaliptos grandis*), $0,81\text{g/cm}^3$ (*eucaliptos tereticornis*) e $0,46\text{g/cm}^3$ (*pinus taeda*). As florestas, por sua vez possuem uma característica importante que é fornecer O_2 e consumir CO_2 do meio ambiente reduzindo o efeito estufa. Para a obtenção do carvão vegetal faz-se a carbonização da madeira nas seguintes etapas:

1ª) Secagem da madeira: ocorre no intervalo de 110°C a 200°C ocorre a vaporização da água;

2º) Pré- carbonização: em temperaturas na faixa de 180°C a 300°C, a fase endotérmica prevalece produzindo líquidos pirolenhosos e pequenas quantidades de gases não condensáveis;

3º) Carbonização da madeira: ocorre reação exotérmica final a 250°C e 300°C produzindo alcatrão solúvel e ácido pirolenhoso;

4º) Carbonização final: o carvão vegetal é formado acima de 300°C há o desprendimento de matérias voláteis.

A madeira é constituída pela lignina, celulose e hemicelulose, das quais nota-se que a quantidade do primeiro componente citado contribui fortemente para elevação do teor de carbono no CV se comparada aos constituintes celulose e hemicelulose, isto ocorre devido a uma menor perda de peso em decorrência de um aumento de temperatura. A Figura 1 e 2, abaixo demonstram o carvão vegetal e o comportamento mencionado na carbonização da lenha para obtenção do carvão, respectivamente.



Figura 1: Carvão vegetal (CIFLORESTAS, 2011).

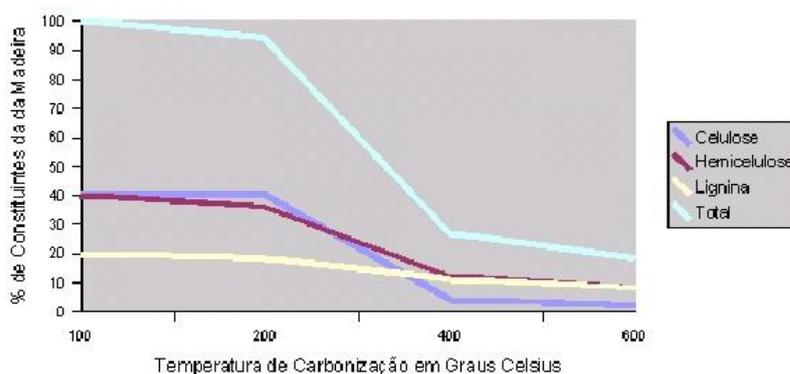


Figura 2: Temperatura de carbonização em função dos constituintes da madeira (ASSIS, 2005).

Em termos de composição para uma carbonização, a lignina possui basicamente cerca de 63,5% em peso de carbono (C), 5,8% em hidrogênio (H₂) e 30,7% em oxigênio (O₂), enquanto a celulose possui 45,1% em C, 4,7% em H₂ e 50,2% em O₂, valores estes que mostram uma maior contribuição de C presente na lignina, que somada a uma maior dificuldade em ser degradar devido as ligações alifáticas e ligações éter alifático-aromático serem mais fortes que os constituintes por base de celulose, que é um polímero linear facilmente quebrado em glicose (ASSIS, 2004). De acordo com (ROGERS, 1999), em uma carbonização com uma produção de 875kg de CV são necessários 600m² de floresta.

Para concentrar certa quantidade de carbono, o processo citado expulsa a maior parte de oxigênio da lenha, bem como aumenta o poder calorífico do carvão. Além disso, um dos fatores que interferem no processo é a temperatura que no seu aumento contribui em uma elevação do teor de carbono no CV com as quedas das concentrações de matérias voláteis e cinzas como demonstra a Tabela 2.

Tabela 2: Análise imediata do carvão vegetal e rendimento em carbono fixo (ASSIS,2008).

Material	Temperatura de carbonização (°C)	Análise química imediata base seca (%)			H ₂ O do carvão (%)	Rendimento em carvão, base seca (%)	Rendimento em carvão, base úmida (%)	Rendimento em carbono fixo (%) [†]
		Carbô-no fixo	Matéria-is voláteis	Cin-zas				
Eucaliptus Grandis 5,5 anos	450	75,06	21,03	3,91	4,17	32,89	28,2	23,66
	550	86,53	10,12	3,33	2,97	28,15	24,2	23,63
	700	89,82	7,20	2,93	2,41	27,57	23,0	24,17

Acima são também apresentados valores de rendimento de carvão (rendimento gravimétrico ou massas geradas) ao final do processo na base seca, o cálculo foi realizado utilizando a Equação1:

$$RG = [(PMS-PC) / PMS] * 100 \quad (1)$$

Onde:

RG= rendimento gravimétrico em %;

PMS= peso da madeira seca em Kg;

PC= peso do carvão em Kg.

4.1 Caracterização do Carvão Vegetal

Diversas propriedades são importantes para viabilizar a utilização de carvão vegetal na injeção pelas ventaneiras a fim de garantir uma “marcha” adequada do alto-forno. Segundo (Assis, 2008), a porosidade, densidade aparente, reatividade com o CO₂, umidade, resistência mecânica, granulometria, carbono fixo, matérias voláteis e cinzas são fatores que devem ser analisados para o emprego de materiais diversos em AF.

A porosidade adequada permite uma maior molhabilidade de gás com as partículas, além de melhores condições na troca de calor e reatividade das fases envolvidas.

A densidade aparente é a relação de massa do material em unidade de volume (kg/m³) podendo ser expressa em carvão ou carbono por metro cúbico. Este fator indica o volume disponível para uma carga metálica de AF, indicando assim a produtividade do reator (MORAIS, 2005).

A reatividade com o CO₂ é o fator importante na característica do carvão vegetal como redutor, pois uma maior reatividade implica em maior cinética da combustão e maior geração de gás redutor da carga metálica (CO) (MORAIS, 2005).

A umidade do carvão deve ser controlada, porque ele é higroscópico. Um nível de água elevada incorporada no carvão ocorrerá em perda do calor de reação na injeção e aumento do consumo de carbono na produção do gusa, além de reduzir a resistência do CV e entupir vasos de transporte do material pulverizado (MORAIS, 2005).

A resistência mecânica necessária para sua injeção pelas ventaneiras é antagônica, quando comparada à carga de CV em AF. Nota-se que, para a injeção, uma resistência mecânica menor é mais adequada, uma vez que granulometrias abaixo de 200 mesh (#) são cominuídas. Este parâmetro de dureza pode ser obtido pelo HGI (*Hardgrove Grindability Index*), do qual um maior índice aponta maior dureza e melhor produtividade na injeção de carvões pulverizados(ICP) (CASTRO, 2001). A granulometria menor, abaixo de 100#, possibilita menor desgaste, maior área de contato gás- sólido há aumento do rendimento da moagem e combustão.

O teor de carbono fixo é função da quantidade de lignina da madeira e da temperatura de carbonização. Quanto maior o seu teor, maiores serão os índices de combustão e taxa de substituição. Segundo (Assis 2008), as matérias voláteis são compostas de carbono, hidrogênio e oxigênio. O seu aumento acarreta em redução no teor de carbono fixo, e por outro lado elevam a reatividade.

Os componentes das cinzas são P, SiO₂, Al₂O₃, S, CaO, MgO, K₂O e Na₂O e suas composições química variam de árvore para árvore. Elevado teor de cinzas é prejudicial tanto no alto- forno, quanto na ICP. Nos dois casos as cinzas consomem calor e ocupa volume dentro da partícula e do alto-forno. Quanto maior o teor de cinzas, menor será o índice de combustão e a taxa de substituição, quando se pratica a ICP(ASSIS, 2006; BRITO 1977; JUVILLAR, 1979).

5 Cana- de- Açúcar

A cana de açúcar é uma das mais importantes fontes de energia no Brasil. Ela pode ser empregada para a forragem, alimentação animal, matéria- prima para a fabricação de açúcar, álcool, rapadura, melado e aguardente (MAPA, 2007). A seguir, a Figura 3 apresenta a imagem referente à cana- de- açúcar e na Tabela 3 mostra o perfil de produção de cana- de- açúcar no Brasil em 2012.



Figura 3: Cana- de- açúcar(ÚNICA 2013).

Tabela3: Produção brasileira de cana, açúcar e álcool(SEAB,2012).

INDICADOR	ÁREA (M/HA)	%	RENDIMENTO(T/HA)	CANA(M/T)	AÇÚCAR(M/T)	ÁLCOOL(B/L)
BRASIL	8 520,54	100	69,84	595,126	37,664	23,624
SÃO PAULO	4 419,5	52	74,7	330,19	22,68	11,85
GOIÁS	725,91	8,5	73,2	53,1	1,92	3,14
MINAS GERAIS	721,8	8,4	72,3	52,2	3,23	2,34
PARANÁ	610,83	7	64,94	39,670	3,086	1,299
MATO GROSSO SUL	542,70	6,4	68,1	36,99	1,71	1,85

Fonte:Seab-Deral; Ibge; Conab; Destino da cana no PR:açúcar 59% e álcool 41%; BR: 50% igual.

Acima é notada, a grande influência da produção paulista de cana- de- açúcar com produção acima de 51%, em relação ao total produzido no Brasil.

Abaixo, na Figura 4 é apresentado o perfil das 6 últimas safras de cana- de- açúcar, no Brasil e as principais regiões produtoras desta.

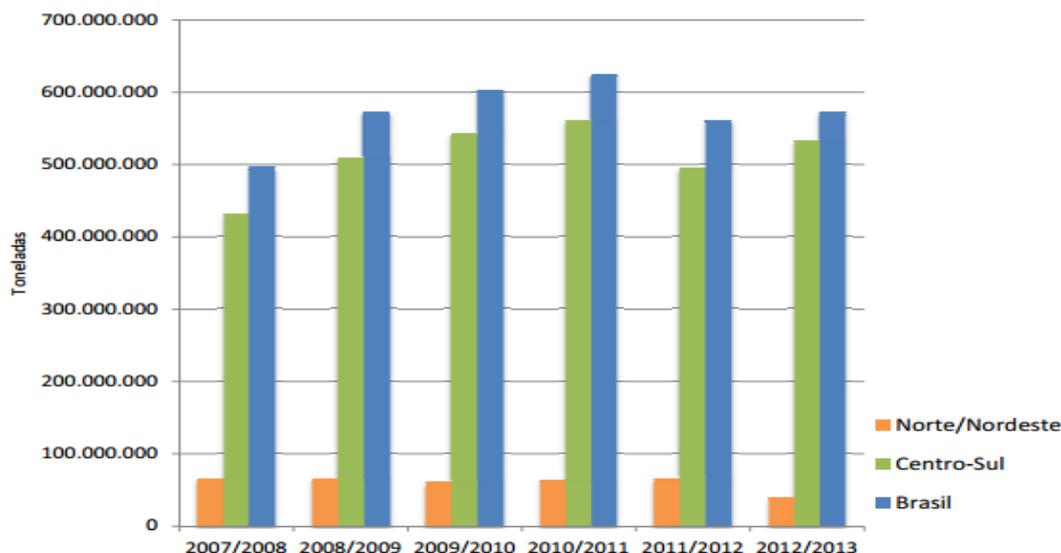


Figura 4: Perfil da produção de cana- de- açúcar no Brasil e suas principais regiões produtoras de cana- de açúcar(ICNA, 2013).

Segundo (ICNA, 2013), a produção aumentou 7,5%, na região Centro/Sul em 2012/13 em comparação ao período de 2011/12. No ano de 2011, observa-se que na região Norte/Nordeste houve redução de 39,4%. Ainda, os declínios de produção, segundo (UDOP, 2011), foi influenciado por fatores climáticos (seca e geada).

5.1 Plantio da Cana-de-Açúcar

O plantio de cana-de-açúcar brasileiro possui elevada produtividade, o que contribui para uma liderança mundial na produção e comércio dessa matéria- prima. A cana pode ser cortada em até seis vezes antes do replantio, e se comparada à produção da Índia que em média corta a cana de duas ou três vezes, a brasileira é maior. Além disso, a produção por hectare da cana é maior do que o plantio de milho para elaboração de etanol em lavouras pertencentes aos Estados Unidos da América (ICNA, 2013).

A cana dependente de fatores climáticos, pluviosidade e intensidade de luz. Estes fatores exercem grande influência sobre o desenvolvimento, produção e qualidade da matéria-prima (SMIT e SINGLES, 2006; UEHARA, 2009). Com isso, ela necessita

de um período quente e úmido, com intensa radiação solar durante o estágio vegetativo, acompanhado de um período seco na fase de maturação e colheita (ALFONSI, 1987).As canas cultivadas são em geral comercializadas por híbridos naturais de *Saccharum officinarum* e *Saccharum barber* (LANDELL, 2006).

6 Bagaço de Cana-de-Açúcar

Segundo (VIANA, 2013), o bagaço de cana pode ser obtido por diversos modos, a saber: por cana com ou sem queima, corte manual e carregamento mecanizado (colheita semi mecanizada) ou por colheita mecanizada (cana picada). Ainda, segundo o CTC,2011 citado por VIANA, 2013, esta variação na forma de se realizar a colheita da cana-de-açúcar terá como resultado porcentagens diferentes de impurezas minerais e vegetais. Usinas sucro-alcooleiras utilizam sistemas de lavagem ou limpeza a seco da cana, e tanto as impurezas quanto estes sistemas de limpeza terão impacto significativo nas propriedades físico-químicas do bagaço. As características do bagaço são influenciadas por fatores climáticos, anteriores e posteriores ao plantio da cana e obtenção do mesmo. A Figura5 ilustra o bagaço de cana.



Figura 5: Bagaço de cana (REVISTAPLANTAR,2013).

O consumo de bagaço de cana pelas indústrias obteve percentual de 19,1% no Brasil em 2011, conforme pode ser observado na Figura 6 e a necessidade energética do país estava avaliada em 88,4 Mtep.

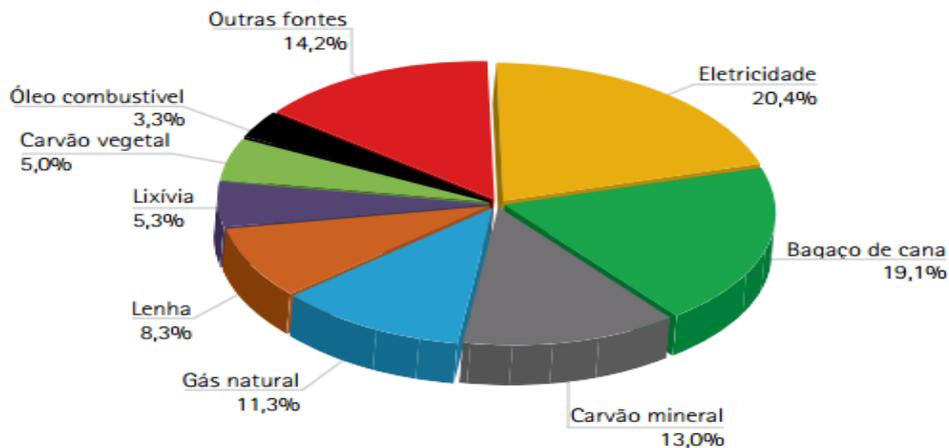


Figura 6: Perfil das fontes energéticas das indústrias brasileiras (EPE, 2013).

Entre as fontes energéticas mais representativas, o bagaço de cana-de-açúcar está em segundo lugar, atrás apenas da eletricidade que possui 20,4% do total.

7 Injeção de Combustíveis nos Altos-Fornos

A injeção de combustíveis em AF se tornou uma importante ferramenta de geração de energia com objetivo de economia no consumo de reductor. Segundo (ASSIS, 2008), a substituição da carga de um granulado por um combustível de menor custo pelas ventaneiras representa o principal objetivo da injeção de combustíveis. Dentro desse contexto, um importante equipamento que possibilitam a aplicação dessa técnica são as ventaneiras, que injetam a altas pressões e temperaturas o ar enriquecido com oxigênio, juntamente com combustíveis, favorecendo a redução da carga metálica. A seguir, Figura 7 apresenta a ventaneira utilizada em altos-fornos.



Figura 7: Sistema de injeção das ventaneiras e *raceway* do alto-forno (MOURÃO, 2007).

Algumas variáveis operacionais normalmente analisadas junto à injeção são: vazão, pressão e temperatura de sopro, que sofrem influência quanto aos seus índices devido aos diferentes materiais energéticos.

7.1 Injeção de Carvão Pulverizado em Altos-Fornos

Como as matérias-primas redutoras, carvão ou coque, vêm se tornando cada vez mais escassa e conseqüentemente, a de maior custo na produção do gusa, toda e qualquer redução no seu consumo deve ser buscado. Durante a produção, estocagem, transporte e processamento do carvão vegetal, muita moinha é gerada, podendo chegar até 30% do carvão bruto. Essa moinha e os seus pós em suspensão nos altos-fornos podem ser injetados pelas ventaneiras podendo haver substituição do carvão granulado pelo topo em proporções de até 1,25 (ASSIS, 2008). Atualmente, mais de 500 altos-fornos no mundo e mais de 30 no Brasil utilizam o processo de injeção de carvão pulverizado (ICP) nas ventaneiras. Porém, o aproveitamento dos finos gerados durante o processo de produção, aliado ao consumo de carvões não coqueificáveis, como os importados de baixo custo e eventualmente alguns carvões do sul do país justificam pesquisas constantes visando melhorar o desempenho (ASSIS, 2008).

Alguns pré-requisitos devem ser seguidos para que a injeção seja mais efetiva, dentre elas destaca-se, segundo (ASSIS, 2004; ROGERS, 1999):

- 1) A queima do carvão pulverizado deve ser feita na zona de combustão, com a menor granulometria possível implicando em uma maior velocidade de combustão, para tal ele deve ser moído em faixas granulométricas específicas e posteriormente secos para retirar umidade;
- 2) A adição de carvão na forma homogênea é feita para garantir equilíbrio térmico e não afetar a marcha;
- 3) O tempo de resposta para a quantidade de carga adicionada é de seis horas para altas taxas de inserção do pulverizado no AF;
- 4) A umidade do carvão não pode superar 4%, para que não haja aglomeração e decaimento maior da temperatura de chama;
- 5) A temperatura de chama deve ser controlada, com uma adição maior de oxigênio ao ar soprado que deve estar a altas temperaturas.

8 MATERIAIS E MÉTODOS

8.1 Matérias- Primas

O carvão vegetal utilizado foi doado pela empresa: Citygusa Siderurgia Ltda, localizado na cidade de Pedro Leopoldo, M.G., Brasil. O bagaço de cana-de-açúcar fora cedido pela Usina Jatiboca na cidade de Ponte Nova, M.G., Brasil.

8.2 Caracterização das Matérias- Primas

8.2.1 Cominuição e Peneiramento

A amostra de 8 kg de bagaço de cana foi homogeneizada, quarteada e pulverizada pelo Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) da UFOP.

Após o recebimento do material, as amostras pulverizadas foram novamente homogeneizadas e peneiradas por 25min por em agitador vertical até que porções de 100 gramas aproximadamente e o peneiramento foi feito durante 25min para cada amostra, às quais foram armazenadas em recipientes plásticos, em frações (x) de $x < 200\text{mesh} (\#)$, $200\# < x < 100\#$, dos quais os valores representados em (x) para a primeira situação são os materiais passantes por uma peneira de 200mesh(#) e para o segunda situação os materiais retidos pela peneira de abertura de 200# e passantes por 100#.

As amostras de carvão vegetal foram cedidas pela empresa Citygusa Siderurgia, e foram caracterizadas de acordo com as normas NBR6923 (carvão - preparação e amostragem, 1981) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

O carvão vegetal pulverizado fora armazenado em recipientes plásticos na mesma faixa granulométrica e massa do bagaço.

Para o uso na tecnologia de injeção, o carvão e o bagaço foram secos para que a umidade estivesse abaixo de 4%.

Para as frações granulométricas abaixo de 200# foram realizadas, pela USIMINAS, análise química elementar e imediata, composição das cinzas, poder calorífico. Os laboratórios da UFOP foram utilizados para outros peneiramentos, para determinação de gases da combustão no simulador de elevado gradiente térmico e para possibilitar o cálculo do índice de combustão através de gases coletados pelo Orsat.

8.2.2 Análise Elementar

A análise elementar consiste em determinar o teor de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre orgânico de um material. A análise do C, H, O, N, S pode ser feita na forma úmida ou na base seca e livre de cinzas, onde os materiais são aquecidos à alta temperatura e os elementos são determinados através da detecção dos espectros emitidos por cada um. Por via seca a análise é mais rápida do que por via úmida. Abaixo, a Figura 8 de um dos equipamentos da empresa LECO, modelo 144 semelhante ao utilizado pela Usiminas.



Figura 8: Equipamento para análise elementar (LECO, 2013).

O material é colocado na barqueta e após ser inserido no equipamento é detectado o S, C, H a 1000° C e por último o O é obtido por diferença.

8.2.3 Determinação do Poder Calorífico

A determinação do poder calorífico superior (PCS) é feita utilizando-se uma bomba calorimétrica, a qual é utilizada para medir o calor liberado pela ignição do combustível com oxigênio. Todas as amostras passam por uma peneira com malha de 60mesh (250µm), e são queimadas em oxigênio puro a uma pressão de 420psi. Um grama de amostra é colocado em recipiente no interior do calorímetro, que está circundado por água a temperatura ambiente. Após faz-se a combustão da amostra através do contato com um fio condutor elétrico. A temperatura da água é medida como uma função do tempo antes e depois do processo de ignição e conhecendo-se a massa de água do sistema, massa e calor específico do recipiente e as curvas de aquecimento e resfriamento da água, a energia liberada durante o processo de combustão pode ser determinada. Um agitador assegura a uniformidade da temperatura da água ao redor da bomba.

O poder calorífico inferior (PCI) é calculado descontando o valor do calor latente da água decorrente do processo de combustão.

A Figura 9 e 10 abaixo mostra um esquema de funcionamento com as partes internas da bomba calorimétrica e imagem do equipamento LECO modelo AC-600 similar ao utilizado pela Usiminas para cálculo do PCS, respectivamente.

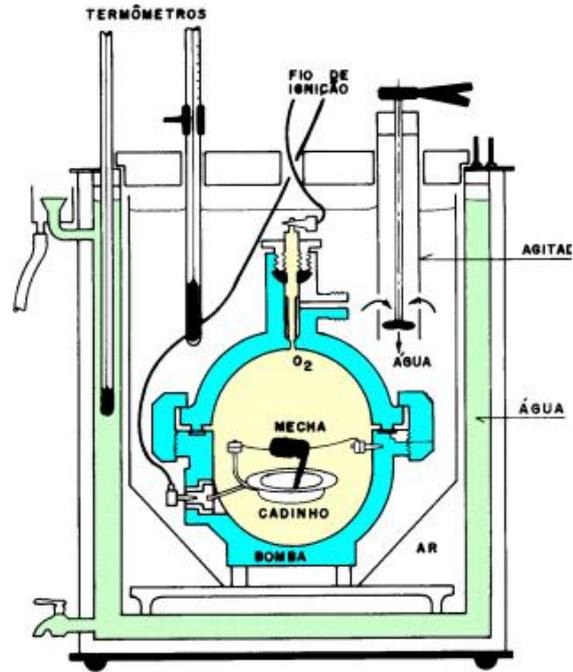


Figura 9: Esquema de funcionamento de uma bomba calorimétrica (LECO, 2013).



Figura 10: Calorímetro para determinação de poder calorífico (LECO, 2013).

8.2.4 Análise Química Imediata

A análise imediata dos componentes do bagaço de cana e carvão vegetal determinará os teores de umidade, matéria volátil, cinzas e de carbono fixo obtido por diferença.

A análise de umidade é feita levando o recipiente com a amostra inicial (m_0) para uma estufa com temperatura prévia de 105°C. Após, o recipiente com a amostra é retirada e levada para o dessecador até que esfrie. Pesa-se novamente a amostra (m_1). O teor de umidade do material é calculado pela Equação 2.

$$TU = [(m_0 - m_1) / m_0] * 100 \quad (2)$$

TU = Teor de umidade, em %;

m_0 = massa inicial de amostra, em g;

m_1 = massa final da amostra, em g.

Para determinar o teor de cinzas coloca-se a amostra de 1g de material em um cadinho sem tampa, levará à mufla com temperatura em torno de 700°C até a queima completa do carvão. Resfria-se o cadinho em dessecador a fim de determinar a massa final. A Equação 3 é utilizada para o cálculo do teor de cinzas.

$$CZ = [(m_1 - m_0) / m] * 100 \quad (3)$$

Onde:

CZ = teor de cinzas, em %;

m_0 = massa do cadinho, em g;

m_1 = massa do cadinho + resíduo, em g;

m = massa da amostra, em g.

A análise de matérias voláteis é feita com 1g de amostra desumidificada. Coloca-se a amostra em cadinho com tampa, e este na porta da mufla a 900°C por 3min. Após este tempo, coloca-se o cadinho dentro da mufla fechada por 7min. Resfria-se o cadinho em dessecador e determina a massa final. A Equação 4 é utilizada para o cálculo do teor de matérias voláteis.

$$MV = [(m_2 - m_3) / m] * 100 \quad (4)$$

Onde:

MV = Teor de matérias voláteis, em %;

m_2 = massa inicial do cadinho + amostra, em g;

m_3 = massa final do cadinho + resíduo, em g;

m = massa da amostra, em g.

O valor do teor de carbono fixo é encontrado através da diferença dos valores de cinza e matérias voláteis da amostra. Os cálculos são feitos pela Equação 5 abaixo:

$$Cf = 100 - MV - CZ \quad (5)$$

Onde:

Cf = teor de carbono fixo, em %;

MV = teor de matérias voláteis, em %;

CZ = teor de cinzas, em %.

8.2.5 Caracterização da Cinza de Materiais por Difração de Raios X

A difração de raios X objetiva a identificação da composição das fases cristalinas de um determinado material. As células cristalinas possuem planos definidos, que são associados ao raio atômico de cada um dos seus átomos e ligações. O difratograma apresenta picos por distâncias interplanares, característica dos compostos presentes.

O difratômetro similar à marca Shimadzu fora utilizado e um sistema computacional específico, por exemplo, o modelo tipo MDI Jade 9 pode ser usado para comparar os picos de incidência em um banco de dados pré-estabelecido definindo quais foram os constituintes que representavam determinados picos. A seguir, a Figura 11 mostra o equipamento de difratometria.



Figura 11: Imagem do difratômetro de raios X (SHIMADZU, 2013).

A radiação de raios X (monocromática) foi imposta às amostras sobre diversos ângulos de incidência, das quais houve dispersão de diferentes comprimentos de onda. Tal fenômeno de difração obedece à lei de Bragg, conforme Equação 6 abaixo.

$$n \lambda = 2d \sin \theta \quad (6)$$

Onde:

N = número inteiro;

λ = comprimento de onda do tubo do aparelho;

θ = ângulo de incidência;

d = espaçamento interplanar.

Segundo (FERNANDES, 2010), os dados resultantes deste processo ótico são obtidos em um detector sob a forma de sinal elétrico amplificado que ficam armazenados na forma digital ou analógica correspondentes aos difratogramas. Estes recebem os sinais elétricos do processo ótico citado e mostram picos característicos da difração de raios X em diferentes planos cristalográficos associados à posição, intensidade e forma da estrutura cristalina determinando a composição das cinzas dos materiais.

8.3 Simulação da Injeção de Materiais Pulverizados pelas Ventaneiras dos Altos-Fornos

8.3.1 Simulador de Injeção de Materiais Pulverizados em Altos- Fornos

O equipamento foi concebido a partir de um modelo desenvolvido pela *Aachen University* que mostrou ser o mais próximo das condições das ventaneiras de um alto-forno devido a altas taxas de aquecimento da ordem de 10^5 K/s e baixo tempo de residência do material na zona de combustão do alto-forno da ordem de 20 ms. A Figura 12 mostra o aparelho montado na Universidade Federal de Ouro Preto.

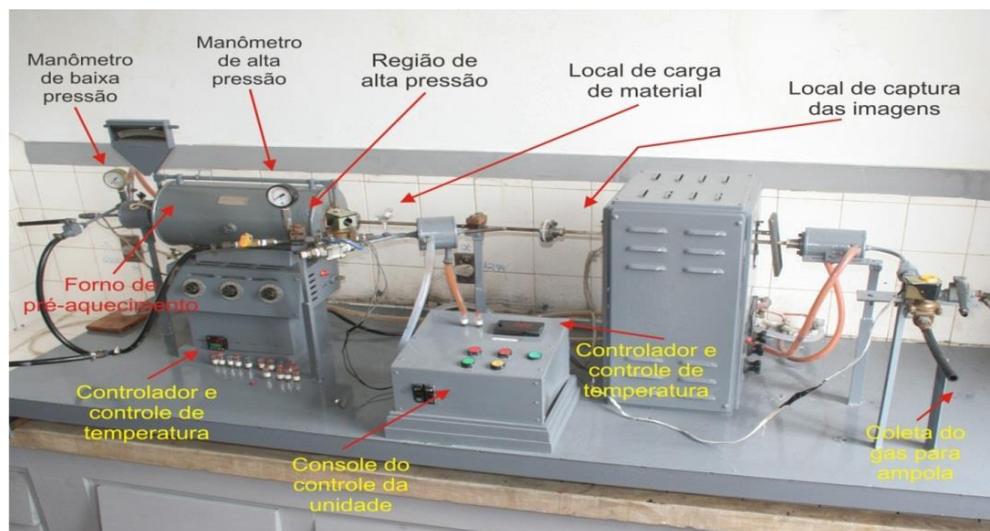


Figura 12: Simulador de Injeção de Materiais Pulverizados em alto-forno.

O aparelho pode ser dividido em duas zonas: uma de alta pressão e outra de baixa pressão. A zona de baixa pressão é composta pelo forno de pré-aquecimento que simula as condições do regenerador de calor de um alto-forno pelo ponto de injeção e o forno de combustão que simula a zona de combustão ou *raceway zone*. A zona de alta pressão é composta pelo manômetro de alta pressão e lança de injeção que é ativada por uma válvula eletromagnética. Todas estas zonas juntas representam as condições físicas de operação e combustão de carvão ou biomassa em um alto-forno.

O gás produzido é coletado e analisado através do analisador de gases ORSAT. Após a análise citada calcula-se o índice de combustão de acordo com a Equação 7 representada abaixo:

$$IC = (\%CO + \%CO_2) \cdot n / [(m_a \cdot \%C / 1200000) - (\%CH_4 \cdot n_g / 100)] \quad (7)$$

Onde:

IC: índice de combustão;

%CO, %CO₂, %CH₄: porcentagens dos gases produzidos;

%C: carbono fixo contido na amostra;

n_g: número de mols do gás depois da experiência;

m_a: massa da amostra de carbono injetada em miligramas.

Ademais podemos dividir o aparelho em seções conforme a Figura 13, da qual são apresentadas as seções de um simulador de elevado gradiente térmico.

Seção1: lança de injeção;

Seção2: regenerador;

Seção3: ponto de injeção na zona de baixa pressão;

Seção4: ventaneira;

Seção5: zona de combustão.

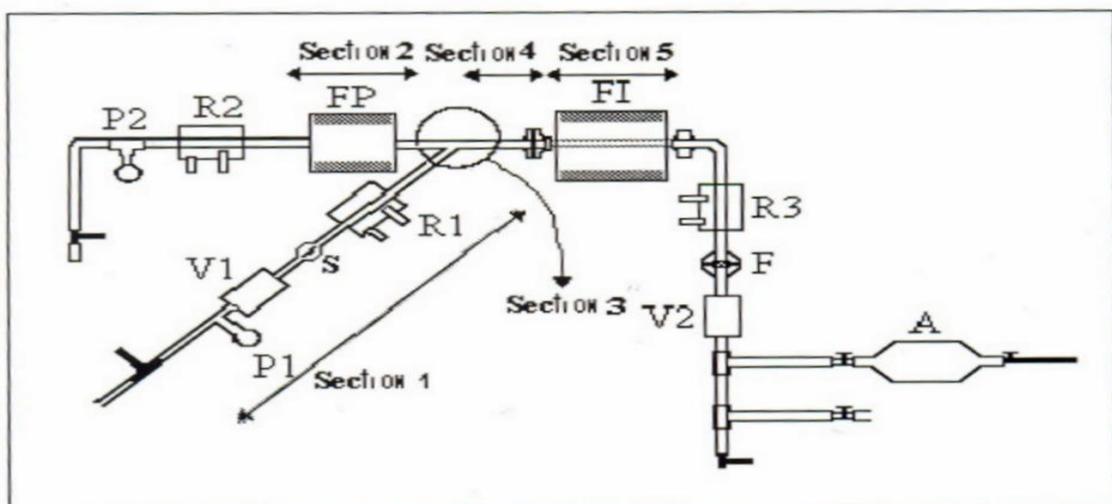


Figura 13: Seções do simulador de elevado gradiente térmico (BRUM, 2009).

8.3.2 Funcionamento do Simulador de Elevado Gradiente Térmico

O aparelho utiliza dois fornos, um de pré-aquecimento e um que simula a zona de combustão. O forno de pré-aquecimento (FP) consiste em um forno elétrico do tipo Kanthal operado com uma variação de temperatura de 0 a 1250⁰C. A temperatura do forno é monitorada por um controle digital de temperatura, ativado por um termopar. A câmara de reação do forno é composta por um tubo de aproximadamente 41,5cm de comprimento e 7,5mm de diâmetro. Essa é de aço inoxidável preenchida com bolas de alumina com 2,5mm de diâmetro. O objetivo principal deste forno é fornecer calor ao oxigênio (em torno de 900⁰ C) simulando a temperatura de sopro do alto-forno. O recipiente com alumina aumenta a residência do gás no interior deste aumentando a eficiência no aquecimento do gás.

O segundo forno (FI) é um forno elétrico capaz de operar acima de 1500⁰ C, sendo também monitorado por um controlador digital de temperatura ativado por um termopar. A finalidade deste forno é simular as características da zona de combustão de um alto-forno.

Próximo a entrada do forno de pré-aquecimento, na Figura 13 existe um manômetro (P2) para ajustar e monitorar a pressão do gás. Após este há um dispositivo de resfriamento (R2) operado com água para assegurar que o calor de dentro do forno de pré-aquecimento não seja conduzido ao gás antes dele chegar ao interior deste. Os dois fornos e a lança de injeção são interligados por tubos de aço inoxidável sendo que no interior do forno de combustão existe um tubo de quartzo para resistir às altas temperaturas promovidas no interior deste.

No final do tubo do forno de combustão existe um filtro (F) para remover a parcela do material que não foi queimado e encaminhar o gás para a válvula eletromagnética (V2) a qual emite um pulso que encaminha o gás para ser coletado em uma ampola de vidro (A) para posterior análise no ORSAT. O dispositivo de resfriamento (R3) protege a ampola e a válvula de um possível aquecimento devido ao calor conduzido pelo tubo de aço que está ligado ao forno de combustão.

A lança de injeção é um tubo de aço inoxidável acoplada ao tubo de baixa pressão por um ângulo de 32° como mostra a seção 3 da Figura 13, a uma distância de 15cm da entrada do forno de combustão. Esta lança é composta por um regulador de precisão para gases (P1) que monitora a pressão do gás responsável pelo carregamento das partículas do material injetado. Próximo a este regulador existe uma válvula eletromagnética (V1) que impulsiona o gás a ser injetado como acontece em um alto-forno. O dispositivo (R1) tem a mesma finalidade que o (R2) e o (R3). O material a ser injetado é introduzido no sistema através de uma abertura de 0.4cm de diâmetro identificado por "S".

8.3.2.1 Metodologia Utilizada na Simulação

O carvão vegetal e o bagaço é levado até o simulador, onde são introduzidos com um auxílio de um funil de vidro na abertura denominada "S".

O gás utilizado neste experimento o oxigênio foi enriquecido e estocado em cilindros de $13m^3$. O cilindro é acoplado ao simulador através de mangueiras devidamente dimensionadas para tal finalidade. Após finalizada a etapa de carregamento o orifício onde o material fora depositado é fechado para não ocorrer a ejeção do material. Cada forno permaneceu previamente aquecido sendo que esse aquecimento foi feito gradativamente aumentando de $100^{\circ}C$ a $200^{\circ}C$ por etapa para não haver risco de ocorrer um curto-circuito e acabar queimando alguma parte do simulador.

O aquecimento prévio dura em torno de 6 horas. O forno de pré-aquecimento opera a uma temperatura de $900^{\circ}C$ e o forno de combustão opera a uma temperatura de $1300^{\circ}C$ aproximadamente. Após aberta a válvula do cilindro, o gás foi destinado para um ramo da mangueira que o conduziu ao forno de pré-aquecimento e outro para a lança de injeção. Desta forma, o gás injetado no forno de combustão ficou aquecido a uma temperatura de sopro similar a atingida em um alto-forno.

Na lança de injeção, o gás arrastou o material particulado sob o comando da válvula eletromagnética (V1) que foi acionada simultaneamente com a válvula (V2) por

apenas 2 segundos repetindo este acionamento por 4 ou 5 vezes a cada queima, gerando um volume de gás suficiente para conduzir as análises no ORSAT. As pressões do gás nos reguladores (P1) e (P2) são respectivamente 5kgf/cm^2 e 2kgf/cm^2 podendo haver algumas variações.

O gás arrastando as partículas do material injetado entrou em contato com o gás vindo do forno de pré-aquecimento e entraram juntos no forno de combustão onde aconteceu a queima. Após a queima foram separados os particulados (cinzas ou materiais não queimados) e o gás coletado nas ampolas. Na Figura14 a seguir tem-se uma ampola utilizada para coletar o gás gerado no simulador de elevado gradiente térmico.



Figura 14: Ampola utilizada para coletar o gás gerado no simulador de elevado gradiente térmico.

As ampolas são de vidro com duas aberturas uma em cada extremidade e um volume interno variando entre 200 e 250ml preenchida com água destilada. À medida que o gás entra na ampola a água é expulsa pela outra extremidade. Logo após o gás ser coletado ele será encaminhado ao analisador de gás ORSAT. Esse procedimento foi repetido para todos os materiais sólidos injetados.

8.3.3 O ORSAT

O analisador de gás ORSAT trata-se de um conjunto de ampolas de vidro contendo em seu interior as soluções necessárias para análise de gás. Este sistema é

interligado por tubos de vidro, onde o gás é forçado a passar (por difusão) ocorrendo uma lavagem do gás, que são separadas nas devidas frações de CO, CO₂ e O₂. As soluções utilizadas são de cloreto de cobre para a obtenção do CO, pirogalol para o O₂ e hidróxido de potássio para o CO₂. Através de um tubo contendo uma solução salina e pela diferença de nível entre este e as ampolas com as soluções, pode-se medir a porcentagem de cada gás que compõem a amostra. A Figura 15 mostra um dos três modelos de ORSAT do Laboratório de Siderurgia da Escola de Minas-UFOP, onde se notam as ampolas com as soluções que separam os gases e a coluna de solução para fazer a leitura através da diferença de nível.



Figura 15: Vista de um ORSAT do laboratório de Siderurgia, Escola de Minas-UFOP.

Como mencionado anteriormente cada ampola tem a função de reter um gás específico, as porcentagens de gases separados são anotados e o índice de combustão é calculado utilizando a Equação 7 citada anteriormente.

8.3.3.1 Metodologia Utilizada para Análise dos Gases no ORSAT

O gás coletado no Simulador de Injeção de Materiais Pulverizados que estava na ampola foi ligado por uma mangueira de borracha ao ORSAT. Após aberta a válvula da ampola o gás foi conduzido por esta mangueira até a válvula de entrada do ORSAT. Para que isso acontecesse foi necessário colocar a outra válvula da ampola

em um balde com água e abrir para obter uma diferença de pressão. Depois que todo o gás contido na ampola foi conduzido para o ORSAT fechou-se a válvula deste e a partir deste momento o gás foi direcionado para cada ampola contendo as soluções afins, uma de cada vez. Escolhida a ampola de solução a ser utilizada, o gás foi forçado a passar por esta e através de uma diferença de nível entre a solução salina e a ampola separando assim a fração do gás que difunde naquela solução.

Finalmente, todo o gás presente no ORSAT foi expulso, para que o procedimento pudesse se repetir para todas outras ampolas contendo os gases das diferentes queimas.

9 RESULTADOS E DISCUSSÕES

9.1 Análise Química Elementar

Na Tabela 4, está apresentada a análise elementar realizada pela empresa Usiminas, do bagaço de cana e do carvão vegetal para granulometria abaixo de 200#. Nota-se um teor de reductores do CV cerca de 20 % maior do que o BC e um teor de enxofre similar entre os dois materiais favorável na produção de ferro gusa em alto – forno a carvão vegetal.

Tabela 4: Análise elementar do bagaço de cana e carvão vegetal.

ANÁLISE		MASSA MOLAR	MATERIAL	MATERIAL
			BAGAÇO DE CANA (%)	CARVÃO VEGETAL (%)
ELEMENTAR	C	12,0107	37,9	63,2
	H	1,0079	5,35	2,9
	O	15,9994	40,48	14,97
	N	14,0067	0,35	0,9
	S	32,065	0,12	0,11

9.2 Análise Química Imediata

Na Tabela 5, a análise imediata do bagaço de cana e carvão vegetal realizada pela empresa Usiminas. O percentual de material volátil do bagaço é elevado indicando alta reatividade para o bagaço. Já o carvão apresenta alto teor de carbono fixo (C fixo), o que contribui para um índice de combustão elevado e maiores taxas de substituição. Por outro lado, as cinzas consomem parte do calor na combustão e seus óxidos serão direcionados para a escória.

Tabela 5: Análise imediata do bagaço de cana e carvão vegetal.

ANÁLISE		MATERIAL	MATERIAL
		BAGAÇO DE CANA (%)	CARVÃO VEGETAL (%)
IMEDIATA	Cz	15,8	18,1
	Mv	72,7	25,8
	C Fixo	11,5	56,1

9.3 Análises da Cinza

Abaixo, na Tabela 6, a composição da cinza do bagaço de cana e carvão vegetal. Os percentuais de SiO_2 e Al_2O_3 entre os materiais são semelhantes e ambos interferem para o aumento da viscosidade, já os teores de MgO e CaO no bagaço de cana é inferior ao carvão indicando uma basicidade quaternária do CV igual a 0,45 e 0,06 do BC.

Tabela 6: Composição química da cinza de bagaço de cana e carvão vegetal.

ANÁLISE		UNIDADE	MATERIAL	MATERIAL
			BAGAÇO DE CANA	CARVÃO VEGETAL
COMPOSIÇÃO DA CINZA	SiO_2	%	43,7	39,29
	CaO	%	1,38	19,61
	Al_2O_3	%	19,79	17,98
	Fe_2O_3	%	14	6,07
	MgO	%	2,55	5,63
	MnO	%	0,45	0,28
	P_2O_5	%	1,69	1,61
	TiO_2	%	0,48	0,74
	Na_2O	%	0,53	0,54
	K_2O	%	5,1	2,67
	ZnO	%	80 PPM	0,03
	SO_3	%	0,2	5,36
	PbO	%	-	53PPM
	Cr_2O_3	%	6,62	-
	NiO	%	3,39	-
	CuO	%	0,03	-
Outros	%	0,02	0,16	

9.4 Poder Calorífico

A seguir, na Tabela 7, os valores de poder calorífico superior e inferior do bagaço de cana e carvão vegetal, realizado pela empresa Usiminas. Nota-se que, o poder calorífico do bagaço de cana é menor que o do carvão vegetal, o que indica um menor valor de taxa de substituição do BC se comparado ao CV.

Tabela 7: Valores de poder calorífico superior e inferior do bagaço de cana e carvão vegetal.

ANÁLISE		MATERIAL	MATERIAL
		BAGAÇO DE CANA	CARVÃO VEGETAL
PODER CALORÍFICO	PCI (cal/g)	3523	5454
	PCS (cal/g)	3799	5604

9.5 Taxa de Substituição de Carbono

De acordo com (PHILLIP, 1997 citado por ASSIS, 2011), a Equação 8 abaixo é usada para determinar a taxa de substituição relacionada com as cinzas e materiais voláteis do material.

$$TS = 1,14 - 0,014 * \%Cinzas - 0,007 * \%MV \quad (8)$$

Onde:

TS = taxa de substituição;

%Cinza = percentual de cinza contidas no material;

%MV = percentual de matéria volátil contida no material.

O cálculo da taxa de substituição (TS) em função da cinza e da matéria volátil do BC e CV resultaram em: 0,4 e 0,7 para o BC e CV respectivamente, ou seja, para cada 2,5 kg de BC ou 1,45 kg de CV, uma economia de 1 kg de carvão da carga será realizada.

9.6 Taxa de Combustão e Percentual da Mistura de Materiais

A análise do teor de mistura entre o bagaço e o carvão fora obtido com uma granulometria compreendida entre 100# e 200# de acordo com a Tabela 8. Nota-se uma melhor taxa de combustão em 91,7% para uma mistura de 75% de CV e 25% de BC. Esta relação na composição de materiais pulverizados na injeção pelas ventaneiras dos altos- fornos serão utilizados nos cálculos de balanço de massa.

Tabela 8: Percentual de cada material presente na mistura e taxa de injeção correspondente.

Carvão vegetal (%)	Bagaço de cana (%)	Taxa de combustão (%) para 100 (kg/t gusa) injetado
0	100	84,6
25	75	86,4
50	50	86,9
75	25	91,7
100	0	92,5

9.7 Análises da Escória Sem Injeção de Materiais Pulverizados pelas Ventaneiras

Em um volume de escória com 150kg/t gusa produzida, sem injeção de materiais injetados pelas ventaneiras, se obteve 142,82kg/t gusa em 95% do volume total com os percentuais de: 44% de SiO₂, 36% de CaO, 5% de MgO e 15% Al₂O₃, conforme

Tabela 9 abaixo adaptação de (ARAÚJO, 1997; ABM, 1979), da qual o índice de basicidade binária encontrado foi de $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,80$.

Tabela 9: Análise da escória sem injeção de materiais pelas ventaneiras (ARAÚJO, 1997; ABM, 1979).

	Volume de escória	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
kg/t gusa em 95% de óxidos	143,82	71,91	57,53	7,19	7,19
Principais óxidos (%)	100	50	40	5	5

A seguir, a Figura 19 mostra um diagrama quaternário com 50% de SiO₂, 40% de CaO, 5% de MgO e 5% de Al₂O₃.

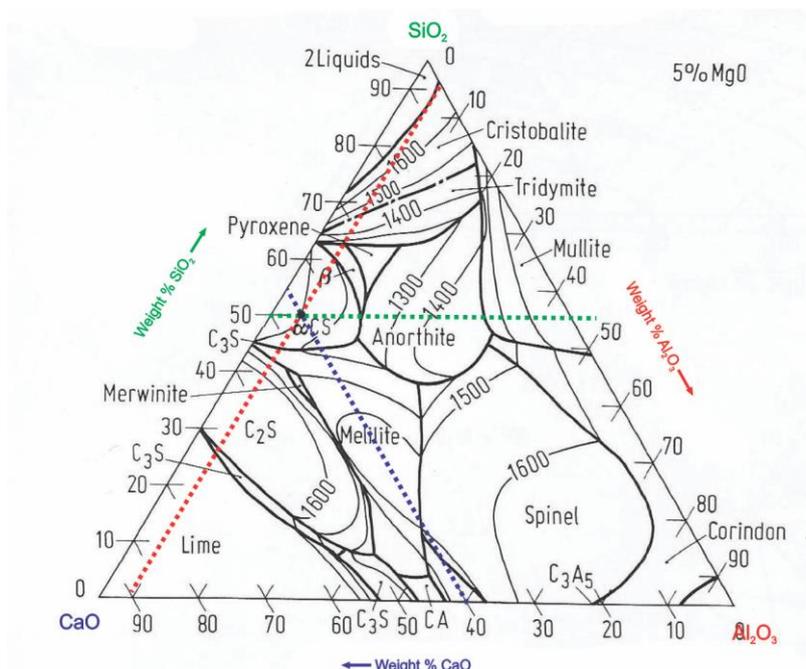


Figura 16: Diagrama quaternário de SiO₂, CaO, MgO e Al₂O₃ (Slag Atlas, 1981).

Acima no diagrama quaternário, a temperatura *líquidus* encontrada foi de 1400°C ou 1673K.

A viscosidade (μ) calculada para a escória com os quatro óxidos citados através da Equação 9 (CASTRO, 1989), abaixo.

$$\ln \mu = -10,3469 + 25144/T - 0,09633(\% \text{CaO}) - 0,11818(\% \text{MgO}) - 0,008013(\% \text{Al}_2\text{O}_3) \quad (9)$$

Onde:

μ = viscosidade dinâmica kg/m. s;

T = temperatura em graus Kelvin (K);

%CaO, %MgO e %Al₂O₃ = porcentagem em peso dos óxidos.

Do cálculo da viscosidade a uma temperatura de 1673 K resultou em 1,219 kg/m. s que correspondem a 12,19 Poise.

9.8 Análises dos Materiais Injetados

O bagaço de cana e o carvão vegetal apresentaram as seguintes porcentagens em peso, Tabela 10 para uma taxa de injeção igual a 100 kg/t gusa. As massas relativas aos materiais injetados a uma composição de 95% de seus principais óxidos também é mostrada.

Tabela 10: Porcentagens em peso do bagaço da cana e do carvão vegetal.

Materiais injetados 100kg/t gusa	100
Carvão vegetal (75% na mistura)	13,575
Bagaço de cana (25% na mistura)	3,95
Soma em 100%	17,525
Soma com 95% em óxidos	16,64875
Carvão vegetal (75% na mistura)	12,89625
Bagaço de cana (25% na mistura)	3,7525

A Tabela 11 apresenta os percentuais de sílica, óxido de cálcio, óxido de magnésio e alumina em 17,525 kg/t gusa de materiais injetados.

Tabela 11: Percentuais de sílica, óxido de cálcio, óxido de magnésio e alumina.

100kg/t gusa	Massa(kg/t)	SiO₂(%)	CaO(%)	MgO(%)	Al₂O₃
Carvão vegetal pulverizado	13,575	0,476	0,238	0,068	0,218
Bagaço de cana	3,95	0,65	0,020	0,038	0,294

A Tabela 12 apresenta a contribuição dos óxidos nas quantidades de massas dos injetados que foram adicionados à escória sem injeção.

Tabela 12: Contribuição dos óxidos na quantidade de massa dos injetados.

Escória injetada	SiO₂	CaO	MgO	Al₂O₃	Total
(kg/t gusa)	8,57	3,14	1,02	3,92	16,65
(%)	51,50	18,87	6,13	23,50	100

As misturas de BC e CV possuem teores maiores de alumina e sílica e menores teores de óxido de cálcio e óxido de magnésio em comparação à escória sem injeção.

9.9 Novo Volume de Escória

A Tabela 13 apresenta o novo volume de escória obtido com a injeção da BC e CV pelas ventaneiras dos altos-fornos. A determinação do volume de escória foi feita considerando um volume pré-estabelecido conforme citado do capítulo 9.7. Nota-se que, para os valores da escória mostrados acima para uma participação de 95% dos principais óxidos presentes na escória e que os valores percentuais dos óxidos sofreram pequena alteração com a incorporação do bagaço de cana e carvão vegetal pelas ventaneiras.

Tabela 13: Novo volume de escória obtido com a injeção da BC e CV.

Novo volume de escória, 95%, (Kg/t gusa)	SiO₂(%)	CaO(%)	MgO(%)	Al₂O₃(%)
160,47	50,16	37,81	5,12	6,91

Da mesma forma, a nova basicidade binária sofreu pequeno decréscimo atingindo valor de 0,75 com variação em torno de 0,05 se comparada a anterior de 0,80.

Na Figura 17 abaixo, o diagrama quaternário mostra a relação entre os quatro principais óxidos para uma escória acrescida de materiais injetados.

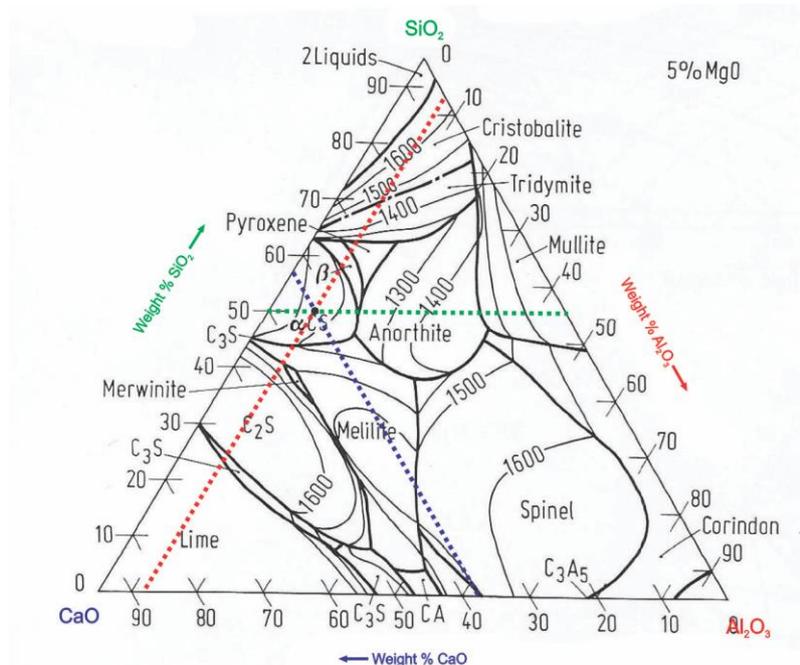


Figura 17: Diagrama quaternário de SiO₂, CaO, MgO e Al₂O₃ (Slag Atlas, 1981).

Nota –se que a temperatura *líquidus* decresceu para 1350°C, aumentando assim, a viscosidade da escória, conforme a Equação 9 subiu para 19,24 Poise, valor não desejado para o escoamento de uma escória pelo furo de corrida de um alto-forno a carvão vegetal.

O cálculo para correção da viscosidade em 12,19 Poise e temperatura líquidus com 1673 K, valor calculado em capítulo anterior permitiu o adicionar pelo topo do alto-forno de uma quantidade de 1,89 % de CaO a mais do que os valores obtidos em uma escória com viscosidade igual a 19,24 Poise. Este percentual equivale a 3 kg/t gusa de CaO que deve ser incorporado à carga de tal forma que a viscosidade ideal (12,19 Poise) seja alcançada. Abaixo, a Tabela 14 mostra os valores percentuais de cada óxido em um volume de 163,50 kg/t gusa de escória, valor somado entre o novo volume de escória e massa adicionada de CaO no topo do reator.

Tabela 14: Valores percentuais de cada óxido em um volume de 163,50 kg/t gusa de escória.

Escória final (kg/t gusa)	SiO ₂ (%)	CaO(%)	MgO(%)	Al ₂ O ₃
163,50	80,48	63,70	8,21	11,10
(%)	49,23	38,96	5,02	6,79

Os resultados inerentes a Tabela 14 acima apresenta índice de basicidade CaO/SiO₂ próximo a 0,90.

Nota-se que o índice de basicidade binária aumentou de 0,80 para 0,90. Este aumento é permitido para limites de basicidade próximas de 1 em altos-fornos a carvão vegetal. Abaixo a Figura 20 mostra a temperatura líquidus próxima a 1350°C em um diagrama quaternário da escória final com os quatro óxidos mais abundantes.

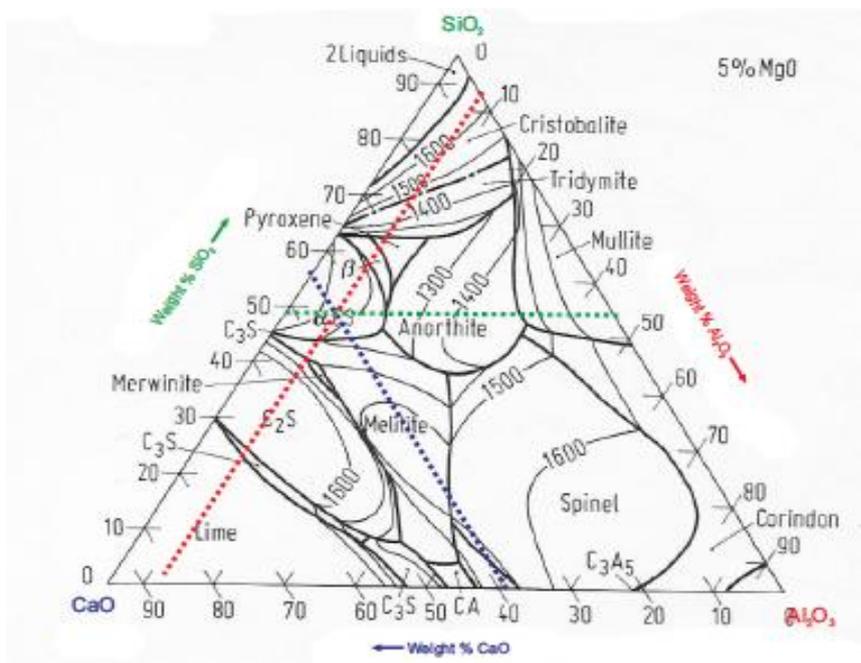


Figura 18: Diagrama quaternário de SiO₂, CaO, MgO e Al₂O₃ (Slag Atlas, 1981).

De acordo com a Fórmula Flint, para cada 100 kg CaO, adicionado em alto-forno 15 kg de carbono deverá ser inserida no reator. Portanto a incorporação de CaO pelo topo é vantajosa quando associada à técnica de injeção.

10 CONCLUSÕES

Em uma análise individual entre o bagaço de cana-de-açúcar e carvão vegetal observam-se uma taxa de combustão inferior do primeiro em relação ao segundo material.

O trabalho possibilitou o uso de técnicas de injeção que apresentou o percentual de 25% de bagaço de cana e 75% de carvão vegetal, esta mistura de materiais pulverizados em altos-fornos obteve um índice de combustão igual 91,7%.

Analisando uma escória típica de um alto-forno a carvão vegetal com operação sem a injeção de materiais pulverizados e outra com injeção a mistura do bagaço e carvão nota-se o aumento da viscosidade de 12,19 para 19,24 Poise e decréscimos da basicidade binária, de 0,80 para 0,75 com variação de 0,05, e da temperatura *líquidus* de 1400°C para 1350°C aproximadamente.

A correção de viscosidade para valor de 12,19 Poise permitiu adicionar de 3 kg/t gusa de CaO ou retirar 1kg de SiO₂ pelo topo de alto-forno obtendo-se basicidade e temperatura *líquidus* adequadas ao processo de transformação em gusa para altos-fornos a carvão vegetal.

A utilização de combustíveis alternativos deve ser estimulada, uma vez que dispomos de grande quantidade de recursos energéticos, que poderão ser empregados no processo de obtenção do ferro gusa de forma mais econômica e com menor emissão de resíduos na natureza, como exemplos o bagaço de cana que normalmente não possui destinação apropriada para reaproveitamento doméstico e industrial.

11 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisar outras composições de escórias de altos-fornos s a coque e a carvão vegetal.

Analisar os balanços mássicos da carga de altos-fornos a fim de aperfeiçoar o processo de obtenção do ferro gusa.

Caracterização de misturas de carvão vegetal, mineral e de gás natural com outros tipos de biomassa.

Realização de ensaios variando a porcentagem de 0% até 25% de bagaço de cana misturado com o carvão vegetal a fim de se obter maximizar uma economia do processo.

Simulação de injeção com amostras pré-aquecidas visando um aumento do seu índice de combustão.

12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO Disponível

em:<http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/Aciaria%20%20Marco%20Polo_Divulgacao.pdf> Acesso em: 24/11/2011.

ALFONSI, R. R.; PEDRO JUNIOR, M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. *Condições climáticas para cana-de-açúcar*. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 42-55.

ARAÚJO, L. A. *Manual de Siderurgia, Produção*. São Paulo, ed.1, v.1, 1997, p. 222-263.

ASSIS, P.A., et al. *Curso de injeção de materiais pulverizados em altos-fornos*. Livro publicado pela ABM, Associação brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005, 292p.

ASSIS, P.A., VIEIRA, C.B., SOBRINHO, P. J. N. *Nem developments for powder Coal Injection into Blast Furnaces*. *Steel Research International*, n. 75, v.4, Abril 2004, p. 235-239.

ASSIS, C.F.C. *Caracterização de Carvão Vegetal para sua Injeção em Altos-Fornos a Carvão Vegetal de Pequeno Porte*. 2003. 113 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

ASSIS, P.A.; SILVA, G. L. R.; SÍRIO, A. *Characterization and Simulation of Combustion of Alternative PCI Coals*. Paper submitted to be presented as Key Lecture at Indian Institute of Kharagpur, India, 9th to 11th Dec. 2011.

BRITO, J. O., BARRICHELO, L. E. G. *Correlações entre Características Físicas e Químicas da Madeira e a Produção de Carvão Vegetal: Densidade e Teor de Lignina da Madeira de Eucalipto*. IPEF, Instituto de Estudos e Pesquisas Florestais. *Circular técnica* N° 14, 1977, p. 9-20.

BRUM J.S. et al. *Avaliação do uso de mistura de bagaço de cana-de-açúcar com carvão vegetal para injeção nas ventaneiras do Alto-Forno*. 30° Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades - 24° Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais. 2009.

CASTRO, L. F. A. *The Mini Blast Furnace – A Challenge for a New Ironmaking*. 1° International Meeting on Ironmaking – ABM - 24 a 26 de setembro de 2001, Belo Horizonte-M.G. V. 1, p. 485 – 494.

CASTRO, L.F.A et al. *Tecnologia de Fabricação do Gusa Líquido em Altos-fornos*. Volume 9 - Escórias de Alto-forno, Belo Horizonte, 1989.

CI FLORESTAS – CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS. Disponível em:<<http://www.ciflorestas.com.br/conteudo.php?id=5318>> Acesso em: 18/08/2013.

CTC – CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. Disponível em:<<http://www.ctcanavieira.com.br> > Acesso em 24/08/2013.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Disponível em:<https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf> Acesso em: 14/08/2013.

FERNANDES, D. P. Estudo de estabilização química, geo-mecânica e ambiental das escórias de aciaria LD para fins de aplicação como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas. 2010.142 folhas. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

GOMES, M. L.I. Avaliação da viabilidade técnica da utilização de misturas do carvão faxinal com importados para injeção em altos – fornos. 2004. 111 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

HUTNY, W. P. et al. *Quality of coal for blast furnace injection*. In: BLAST FURNACE INJECTION SYMPOSIUM, 1996, Cleveland. Proceedings. Ohio, 1996 p.1-31.

IABr- INSTITUTO AÇO BRASIL. Disponível em:<<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/numeros--mercado.asp>> Acesso em: 24/08/2013.

ICNA – INSTITUTO CNA. Disponível em:<<http://www.icna.org.br/sites/default/files/relatorio/RELAT%C3%93RIO%20DO%20AGRONEG%C3%93CIO%20-%20janeiro%20de%202013.pdf>> Acesso em: 17/08/2013.

JUVILLAR, J. B. *O Carvoejamento da Madeira e seus Reflexos na Qualidade do Carvão: Qualidade da Madeira*. IPEF, Instituto de Estudos e Pesquisas Florestais. Circular técnica N° 64, setembro de 1979, 6p.

LANDELL, M. G. A. ; XAVIER, M. A. ; ANJOS, I. A. ; VASCONCELOS, A. C. C. M. ; PINTO, L. R. ; CRESTE, S. *Potencialidade de novas variedades de cana-de-açúcar. Tópicos em tecnologia sucroalcooleira*. Em: MO Marques; MA Muttom; AAPM Azania, LC Tasso-Junior; GA Nogueira; DW Vale. (Org.). Tópicos em tecnologia Sucroalcooleira. 1ª ed.Jaboticabal. : Multipress. 2006.v. 1, p. 17-30.

LECO. Disponível em: <<http://www.leco.com/products/analytical-sciences/sulfur-carbon-analyzers/144-series>>Acesso em: 24/03/2013.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *Plano nacional de agroenergia*. Brasília: MAPA, 2005. 118 p. Disponível em:<<http://www.agricultura.gov.br>>Acesso em 18/08/2013.

MORAIS, S. A. L., NASCIMENTO, E. A., MELO, D. C. *Análise da Madeira de Pinus Carpa Parte 1 – Estudo dos Constituintes Macromoleculares e Extrativos Voláteis*. SIF, Sociedade de Investigações Florestais, Revista Árvore, v.29, n.3, 2005, p.461-470.

MOURÃO, M. B. et alli. *Introdução a Siderurgia*. Livro publicado pela ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007, 428p.

PHILLIP, R.G., BENNET, A. *Advantages of Low Volatile Coals for PCI*. Report – Department of Mines and Energy – Q Therm Project, Brisbane QLD, 1997.

REVISTA PLANTAR. Disponível em: <<http://www.revistaplantar.com.br/bagaco-da-cana-de-acucar-combate-o-acionamento>> Acesso em: 24/08/2013.

ROGERS, B. E.; SMITH, M. R. *Increased use of natural gas in blast furnace in North America*. Union Gas Limited, Canada, 1999.

ROMEIRO, S. B. B. *Química na Siderurgia/ Solange Bianco Borges Romeiro*. -- Porto Alegre: Área de Educação Química do Instituto de Química da UFRGS, 1997.

SEAB – SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/cana_2012_13.pdf> Acesso em: 15/08/2013.

SHIMADZU. Disponível em: <<http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/difratometros/xrd-7000.shtm>> Acesso em: 16/08/2013.

SLAG ATLAS. **Slag Atlas**. Verlag Stahleisen M.B.H, Dusseldorf, 1981. p. 84.

SMIT, M. A.; SINGELS, M. A. *The response of sugarcane canopy development to water stress*. Field Crops Research, Perth, v. 98, p. 91-97, 2006.

UDOP – UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENNERGIA. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/>>. Acesso em: 24/08/2013.

UEHARA, N.; SASAKI, N. AOKI, N. OHSUG, R. *Effects of the temperature lowered in the daytime and night-time on sugar accumulation in sugarcane*. Plant Production Science, Tokyo, v. 12, n. 4, p. 420-427, 2009.

UNICA – UNIÃO DA INDUSTRIA DE CANA- DE- ACÚCAR. Disponível em: <www.unica.com.br> Acesso em: 15/08/2013.

UNISINOS. Disponível em: <<http://www.estudostecnologicos.unisinos.br/pdfs/56.pdf>> Acesso em: 24/08/2013.

VIANA, S.T. *Caracterização de mistura de bagaço de cana-de-açúcar e carvão mineral para sua injeção em altos- fornos*. 2013. 48 folhas. Monografia (Graduação

em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Engenharia Metalúrgica – DEMET,
Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.