

AVALIAÇÃO METALÚRGICA E AMBIENTAL DA INJEÇÃO DE CARVÃO MINERAL E CAPIM ELEFANTE (*PENNISETUM PURPUREUM*) PULVERIZADO EM ALTO-FORNO*

Ricardo dos Santos Oliveira¹
Carlos Frederico Campos de Assis²
Paulo Santos Assis³

Resumo

Devido ao grande aumento da concentração de gases do efeito estufa, a criação de uma energia limpa tem sido um desafio para a ciência e as indústrias. Após identificar possíveis soluções para este problema uma alternativa seria a utilização de biomassa vegetal com capacidade térmica como fonte energética redutora no processo de redução do minério de ferro em altos-fornos. Este trabalho teve como objetivo utilizar capim elefante (*Pennisetum purpureum*) e carvão mineral na injeção de finos pulverizados pelas ventaneiras de altos-fornos nas siderúrgicas a fim de reduzir custos da produção de ferro gusa e reduzir a dependência de combustíveis fósseis no processo. O capim elefante é uma fonte renovável e de rápido crescimento que através da fotossíntese captura o CO₂ da atmosfera, reduzindo a poluição causada pelos altos-fornos. Para simular a injeção dos materiais estudados foi construído na Escola de Minas - UFOP um modelo de partículas de combustão para analisar as amostras. Outras técnicas são utilizadas para caracterização como combustão, calorimetria, análise de gás, análise química imediata e elementar. Assim, em teoria, esta pesquisa mostra que o capim elefante misturado com carvão mineral através de sua injeção em altos-fornos mostrou-se viável em termos metalúrgicos e ambientais.

Palavras-chave: Alto-forno; Capim elefante; Carvão mineral; Injeção.

METALLURGICAL AND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF INJECTION OF PULVERIZED COAL AND ELEPHANT GRASS (*PENNISETUM PURPUREUM*) IN BLAST FURNACE

Abstract

Due to the large increase in the concentration of greenhouse gases, creating a clean energy it has been a challenge for science and industry. After identifying possible solutions to this problem an alternative would be the use of biomass with thermal capacity as a reduction energy source in the process of reduction of iron ore in blast furnaces. This work aimed to use elephant grass (*Pennisetum purpureum*) and coal in the pulverized fines injection on tuyeres of blast furnace of steel mills in order to reduce costs of production of pig iron and reduce dependence on fossil fuels in the process. Elephant grass is a renewable source and rapid growth that through photosynthesis captures CO₂ from the atmosphere, reducing the pollution caused by blast furnaces. To simulate the injection of the materials studied was built at the School of Mines - UFOP a model of combustion particles to analyze the samples. Other techniques are used for characterization as combustion calorimetry, gas analysis, and elemental chemical analysis. Thus, in theory, this research shows that elephant grass mixed with coal through its injection in blast furnaces proved viable in metallurgical and environmental terms.

Keywords: Blast furnace; Elephant grass; Coal; Injection.

¹ Graduado em Engenharia Metalúrgica – UFOP, Aluno de mestrado em Engenharia de Materiais - REDEMAT/UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

² Professor do DMQ, CEFET-MG, Timóteo, MG, Brasil.

³ Professor Doutor Titular na REDEMAT e UFOP – ESCOLA DE MINAS. Pesquisador CNPq. Conselheiro da EcoEnviroX, Ouro Preto, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A emissão de gases causadores do efeito estufa na atmosfera tem aumentado, o desenvolvimento trouxe a poluição, e com isso há uma necessidade de encontrar formas de reduzir essas emissões. O conceito de sequestro de carbono foi consagrado pela Conferência de Kyoto, em 1997, na qual, em 2005, entrou em vigor o Protocolo de Kyoto com a finalidade de limitar e reverter as emissões de gases causadores do efeito estufa e também estabelecer uma proposta de desenvolvimento para a sustentabilidade dos recursos naturais. As indústrias que obtiverem energia alternativa através de mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL), como o uso de biomassa, obterão crédito de carbono [1,2,3,4].

A produção mundial de aço somou 1,66 bilhões de toneladas em 2014 segundo dados divulgados pela Worldsteel, na qual 53% do aço foram produzidos na China, 23% em outros países em desenvolvimento e 24% em países desenvolvidos [5].

A siderurgia é responsável por até 5% das emissões mundiais de CO₂ e 3% de gases causadores do efeito estufa [6,7,8,9]. Neste cenário o alto-forno é responsável em torno de 65% dessas emissões emitindo cerca de 1,8 toneladas de CO₂ para cada tonelada de aço produzido [1].

A injeção de finos de carvão pelas ventaneiras de altos-fornos é um importante meio de reduzir o custo de produção de ferro-gusa e reduzir a dependência de coque no processo e pode ser encontrada em alguns setores taxas de injeção superiores a 200 kg/t de gusa. No alto-forno, o objetivo é manter altas taxas de injeção de finos de carvão e de produtividade, o que constitui um desafio tecnológico [10,11,12].

A produção de energia através da biomassa representa hoje um desafio para a ciência. A utilização de carvão mineral que é um combustível fóssil ocasiona graves consequências, pois é uma fonte esgotável de energia, e contribui para o efeito estufa. Como a queima de biomassa no máximo recicla CO₂ que foi retirado da atmosfera pela fotossíntese, tudo indica que, esta é uma alternativa energética para contornar a crise ambiental e a dependência de combustíveis fósseis [4].

Este trabalho teve como objetivo estudar a inserção de outra fonte de energia para a injeção nas ventaneiras de altos-fornos, como a mistura de biomassa de capim elefante juntamente com o carvão mineral.

O capim elefante cujo nome científico é *Pennisetum purpureum*, é uma espécie típica de clima tropical, oriunda da África, que se adaptou muito bem aos diversos tipos de climas brasileiros [4]. É, também, uma biomassa abundante, de rápido crescimento e produtividade (30-80 toneladas/hectare/ano) e que é cultivada para criação de gado [13]. O uso dessa biomassa no processo de injeção implicaria na redução do consumo de carvão mineral, além de auxiliar no aumento da produtividade e redução de custos de produção, oferecendo uma maior sustentabilidade econômica e ambiental na produção de ferro-gusa [10,14,15].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho estudou-se o comportamento de misturas de carvão mineral com capim elefante pulverizado para injeção em altos-fornos.

Inicialmente as amostras passaram por um ensaio de granulometria com o objetivo de classificar todo material de granulometria entre 200# e 100#. Em seguida as amostras passaram pela estufa a fim de minimizar a umidade do material para 5%. As misturas entre carvão mineral e capim elefante são de 25%, 50% e 75%, para uma taxa de injeção de 50 kg/t gusa, 100 kg/ t gusa e 150 kg/t gusa.

Uma vez preparadas, as amostras foram submetidas à análise química imediata utilizando adaptações da EN 14774 [16], EN 14775 [17] e EN 15148 [18]. A análise química elementar foi levada a cabo usando uma adaptação da norma EN 15104 [19] e EN 15289 [20], o poder calorífico foi analisado usando a norma EN 14918 [21] e as amostras seguiram para o Simulador de Injeção de Materiais Pulverizados em Altos-Fornos, ensaio realizado no Laboratório de Siderurgia da Escola de Minas / Universidade Federal de Ouro Preto. O equipamento simula as condições existentes na injeção de materiais pulverizados em ventaneiras de altos-fornos, a fim de se determinar o índice de combustão do material em questão.

Uma das questões que podemos destacar é o baixo tempo de residência da partícula no jato de gás na zona de combustão do alto-forno. Este tempo é da ordem de 20 à 50ms (= 0,02 a 0,05s). A outra é o elevado gradiente térmico (10^5 K/s) que o material pulverizado sofre quando é injetado nas ventaneiras.

O equipamento utiliza dois fornos, um forno de pré-aquecimento (FP) do tipo Kanthal operado com uma variação de temperatura de 0 a 1250°C. A temperatura do forno é monitorada por um controlador 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 7,5cm de diâmetro, sendo esta de aço inoxidável. O objetivo principal deste forno é fornecer calor ao oxigênio (em torno de 1000°C) simulando a temperatura de sopro do alto-forno. O segundo forno (FI) simula a zona de combustão capaz de operar a temperaturas acima de 1500°C, sendo 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.

O Simulador de Injeção de Materiais Pulverizados em Alto-Forno pode ser dividido em 5 seções para um melhor entendimento do aparelho, como mostrado na Figura 1.

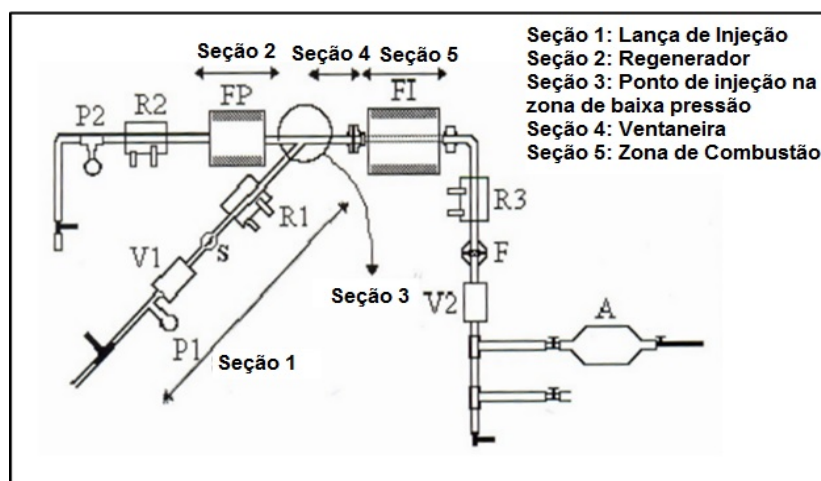


Figura 1. Desenho esquemático das regiões do simulador de injeção de materiais pulverizados em altos-fornos [22].

Próximo à entrada do forno de pré-aquecimento (FP) existe um manômetro (P2) para ajustar e monitorar a pressão do gás, logo após este, existe 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 atingidas no interior deste.

A lança de injeção é um tubo de aço inoxidável acoplada aos dois fornos por um ângulo de 32° como mostra a seção 3, na Figura 1, a uma distância de 15cm da entrada do forno de combustão, esta lança consiste de um regulador de precisão para gases (P1) que monitora a pressão do gás o qual irá carregar as partículas de 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.

No fim do tubo do forno de combustão existe um filtro (F) para remover a parte 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) e depois segue para posterior análise no analisador de gás ORSAT mostrado na Figura 2. 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.



Figura 2. Ampola de vidro para coleta de gás (a) e analisador de gás ORSAT (b).

O equipamento ORSAT trata-se de um conjunto de ampolas de vidro contendo em seu interior soluções necessárias para a captura do gás. Este sistema é interligado por tubos de vidro por onde o gás é forçado a passar, gerando assim, uma leitura no teor de CO, CO₂, O₂ e CH₄. As soluções utilizadas são de cloreto cúprico para o CO, hidróxido de potássio para o CO₂, pirogalol para o O₂ e cloreto de sódio para o CH₄. Foram feitas 5 replicatas para cada mistura de carvão mineral com capim elefante e também para 100% de carvão mineral e 100% de capim elefante. Para o procedimento da análise do gás foi utilizado a norma CETESB E17.010 [23]. Os resultados das amostras variaram de 0,7 à 1,0%, na qual foram feitas uma média dos valores encontrados para calcular a taxa de combustão.

Após a análise, o cálculo da taxa de combustão foi feito pela Equação 1:

$$TC = K * (\%CO + \%CO_2) * n_g / [(m_a * \%C_f / 12000) - (\%CH_4 * n_g)] \quad \text{#####}1)$$

Em que:

- TC = Taxa de combustão;
- K = Constante em função das condições do ensaio.
- %CO, %CO₂, %CH₄ = Porcentagens dos gases produzidos;
- %C_f = 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;

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O carbono é um gerador de calor e participa indiretamente da redução da carga metálica. Geralmente quando o teor de carbono aumenta, aumenta a taxa de substituição. Quando o teor de matéria volátil aumenta, aumenta a taxa de combustão. As necessidades de enriquecimento em oxigênio para manter a temperatura na zona de combustão diminuem quanto maior for o teor de carbono fixo, porém, para altas taxas de injeção e alto teor de carbono fixo, para que haja altas taxas de combustão, será necessário o enriquecimento do ar com oxigênio, devido a grande diminuição da relação O/C [22,24]. Observa-se na Tabela 1 que o carbono fixo do carvão mineral é 4,79 vezes maior que do capim elefante e o carbono elementar do carvão mineral é 2,04 vezes maior que do capim elefante.

Na Tabela 1, também é possível observar que a quantidade de materiais voláteis, que são substâncias formadas pelos elementos químicos oxigênio, carbono e hidrogênio, do capim elefante é 4,7 vezes maior que a do carvão mineral.

O carbono é um gerador de calor com maior potencialidade que o hidrogênio. Porém, o aumento do teor de hidrogênio dentro do alto-forno reduz a queda de pressão na rampa, a redução do FeO é menos endotérmica que a do carbono, com maior velocidade e em menor temperatura. Isso implica que pode ser utilizada menor temperatura de chama no alto-forno, tornando isso um ponto positivo. Um ponto negativo é que altos teores de hidrogênio podem levar a grande quantidade de finos de coque na cuba do alto-forno [22,24]. A Tabela 1 mostra que o capim elefante possui mais hidrogênio que o carvão mineral.

O aumento do teor de cinzas irá aumentar o volume da escória e aumentar o consumo de calor no alto-forno e, também, leva a um aumento no consumo de carbono, o que reduz a taxa de substituição, aumenta as necessidades de fluxantes e, conseqüentemente, diminui a produção. Os teores de cinzas abaixo de 18% são aceitáveis [24,25]. De acordo com a Tabela 1, o carvão mineral e o capim elefante apresentam teores de cinzas aceitáveis.

O enxofre (S) do combustível quando incorporado no ferro-gusa necessitará de dessulfuração posterior, na fabricação do aço. Para diminuir o teor de enxofre no ferro-gusa utiliza-se aumentar o volume da escória e sua basicidade, aumentando o custo de produção do alto-forno. O limite desejável para enxofre é de 0,8% total nas matérias-primas [22,24]. A Tabela 1 apresenta o teor de enxofre do carvão mineral e do capim elefante bem menor que este limite.

O oxigênio (O) participa da combustão do carbono, hidrogênio e hidrocarbonetos existente no material pulverizado injetado no alto-forno. Sua presença é importantíssima para o aumento da taxa de injeção no alto-forno e diminuição da variação de pressão interna do alto-forno. Desta forma, o oxigênio existente nos materiais reagirá com as substâncias oxidáveis no momento da queima, economizando oxigênio a ser injetado pelas ventaneiras. É importante salientar que isso ocorre quando o oxigênio encontra-se puro (O₂). Na Tabela 1, o capim elefante apresenta teor de oxigênio 11,19 vezes maior que o de carvão mineral.

Geralmente, a taxa de substituição aumenta quanto maior o poder calorífico dos carvões injetados. Carvões com alto poder calorífico superior aumentam o fluxo de calor na zona de combustão e, conseqüentemente, a temperatura de chama [28]. Através da Tabela 1 verifica-se, também, que o maior poder calorífico superior é do carvão mineral, que chega a ser 2,04 vezes maior que do capim elefante.

Tabela 1. Resultados referentes às análises de poder calorífico superior, superfície específica, análise química elementar e imediata.

Análises		Carvão mineral	Capim elefante
Elementar	Carbono [%]	80,60	39,48
	Hidrogênio [%]	3,85	5,87
	Oxigênio [%]	3,34	37,39
	Nitrogênio [%]	1,81	1,84
	Enxofre [%]	0,30	0,19
Imediata	Cinzas [%]	10,10	5,43
	Materiais Voláteis [%]	16,87	79,34
	Carbono fixo [%]	73,04	15,23
Poder Calorífico Superior [kcal/kg]		7442	3642

Utilizando o simulador de injeção de materiais pulverizado em alto-forno, mostrado na Figura 1, foi possível gerar o gráfico mostrado na Figura 3, na qual se observa que o aumento da taxa de injeção provoca uma diminuição da taxa de combustão de todos os materiais analisados. Isto é influenciado principalmente pelas condições extremamente severas e do oxigênio presente na zona de combustão. Esses parâmetros influenciam negativamente na eficiência de combustão. Isto pode ser explicado pela menor relação O/C presentes na zona de combustão, portanto gerando uma menor taxa ^[11].

Comparando os materiais puros (100%), carvão mineral e capim elefante, a Figura 3 apresenta taxa de combustão maior para capim elefante, para todos os valores analisados. Isso pode ser explicado pelo maior teor de materiais voláteis, apresentado no capim elefante. Os voláteis aumentam a reatividade dos materiais, melhorando a combustibilidade dos mesmos, pois eles queimarão primeiramente que o carbono fixo ^[26].

Isso pode ser visto também nas misturas, ou seja, quanto maior a quantidade de capim elefante na mistura com carvão mineral, maior será a taxa de combustão, para cada taxa de injeção específica (50, 100 e 150 kg/t gusa). A mistura de 50% de capim elefante e 50% de carvão mineral apresentou a melhor taxa de combustão para as taxas de injeção estudada. Assim, pode-se dizer que existe uma simbiose entre a pirólise e a combustão de materiais voláteis de ambos os materiais.

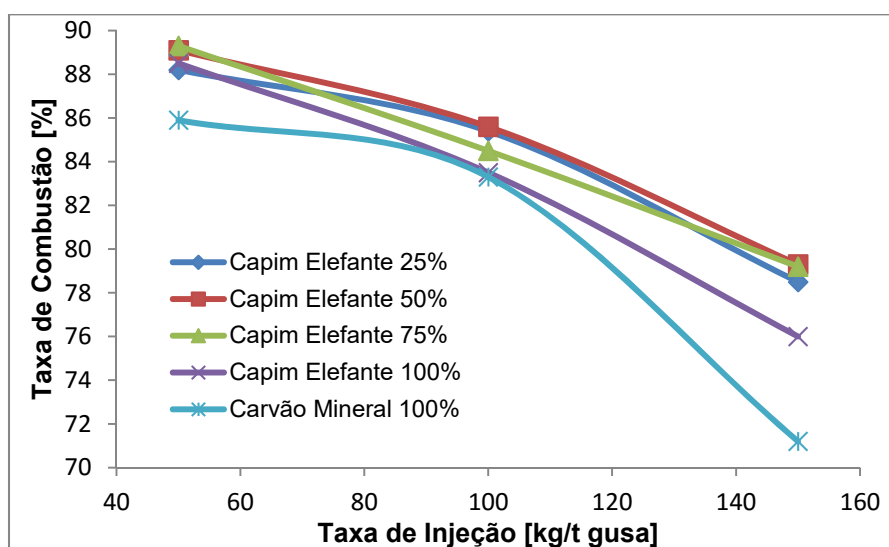


Figura 3. Relação entre taxa de injeção e taxa de combustão, para mistura entre capim elefante e carvão mineral, granulometria entre 200# e 100#.

Considerando-se especificamente a produção do alto-forno sem injeção, as emissões de carbono são relevantes, pois na produção de uma tonelada de ferro gusa, utilizando 500kg de coque, são emitidos 1500 kg de dióxido de carbono (CO₂) [1]. Usando os dados da Tabela 1, observa-se que o cultivo de capim elefante no Brasil produz em média 40,0 t de capim elefante/hectare/ano e o cultivo possui de crédito (ou excedente) 16,8 t CO₂/hectare/ano [4,27].

Tabela 2. Dados compilados para cálculo teórico da geração de gás “CO₂” em alto-forno a coque, para injeção de 100 kg de capim elefante.

Itens	Quantidade	Referência
Taxa de substituição para injeção 100 kg de capim elefante/t gusa	0,7	[28]
Geração de gás “CO ₂ ” em alto-forno a coque, sem injeção	1500 kg/t gusa	[1]
Consumo de coque no alto-forno, sem injeção	500 kg/t gusa	[1]
Produção de capim elefante	40 t/hectare/ano	[4]
Crédito (excedente) de “CO ₂ ” referente setor de plantação do capim elefante	16,8 t CO ₂ /hectare/ano	[4]

Desta forma para injeção de 100 kg de capim elefante/t gusa e com a taxa de substituição de 0,7 temos:

1 - A diminuição da quantidade de “CO₂” produzido no alto-forno a coque com injeção de 100 kg de capim elefante/t gusa:

- Para cada 100 kg de capim elefante/t gusa injetado retira-se do topo do alto-forno 70 kg de coque/t gusa.
- Consumo de coque com injeção de 100 kg de capim elefante = 500 – 70 = 430 kg coque/t gusa.
- 500 kg de coque/t gusa ----- produz 1500 kg de CO₂/t gusa
430 kg de coque/t gusa ----- “X”
X = 1290 kg de CO₂/t gusa produzido no alto-forno com a injeção da biomassa de capim elefante.
- 1500 – 1290 = 210 kg de CO₂/t gusa reduzido do alto-forno com a injeção da biomassa de capim elefante.

2 - A quantidade absorvida de “CO₂” para produzir 100 kg de capim elefante:

- 40 t de capim elefante ----- Crédito de 16,8 t de CO₂
100 kg de capim elefante/t gusa ----- “Y”
Y = 42 kg de CO₂/t gusa absorvido pela plantação de capim elefante.

Desta forma para injeção de 100 kg de capim elefante/t gusa e com a taxa de substituição de 0,7 temos uma diminuição de 252 kg de CO₂/t gusa. Uma redução de 16,8% de CO₂ na atmosfera pelo alto-forno.

4 CONCLUSÃO

Os resultados analisados mostram que o capim elefante pode ser usado na injeção de finos pelas ventaneiras do alto-forno. A taxa de combustão foi melhor para a mistura de 50% de capim elefante e 50% de carvão mineral.

Importante salientar que a redução de 16,8% na geração de “CO₂” pelo alto-forno é significativa ambientalmente devida o capim elefante (*Pennisetum purpureum*) absorver parte do dióxido de carbono da atmosfera emitido pelo alto-forno através da fotossíntese.

Agradecimentos

Os autores deste artigo gostariam de agradecer ao Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas pela análise elementar, a EcoEnviroX por apoiar o desenvolvimento deste estudo, ao CEFET-MG unidade Timóteo, a REDEMAT e a UFOP pelo apoio incondicional à inovação. A Fundação Gorceix e CAPES pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Caracterização do uso da Energia no Setor Siderúrgico Brasileiro. 2009 ; 1-89.
- 2 Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico (2010-2025). 2009; 1-36.
- 3 Instituto Aço Brasil. Relatório de Sustentabilidade 2012. Concepção AMCE Negócios Sustentáveis. 2012; 1-93.
- 4 Vilela H, Cerize D. Capim Elefante Paraíso na Geração de Energia. Portal Agronomia, ciência e tecnologia. 2009 [acesso em 21 mar. 2016]. Disponível em: http://www.agronomia.com.br/conteudo/artigos/artigos_capim_elefante_paraíso_geracao_energia.htm.
- 5 Worldsteel Association. Steel's contribution to a low carbon future and climate resilient societies. Worldsteel position paper January, 2015 [acesso em 9 fev. 2016] Disponível em: <http://www.worldsteel.org/publications/position-papers/Steel-s-contribution-to-a-low-carbon-future.html>.
- 6 Araújo LA. Manual de Siderurgia. 2º edição. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.
- 7 Rodrigues GF, Junca E, Telles VB, Espinosa DCR. Redução das emissões de gases de efeito estufa através do uso de hidrogênio na siderurgia. Revista Brasileira de Ciências Ambientais. 2011; 21: 48-53.
- 8 G.F. Porzio, B. Fornai, A. Amato, N. Matarese, M. Vannucci, L. Chiappelli, V. Colla. Reducing the energy consumption and CO₂ emissions of energy intensive industries through decision support systems e an example of application to the steel industry. Applied Energy. 2013; 112: 818-833.
- 9 N. Karali, T. Xu, J. Sathaye, Reducing energy consumption and CO₂ emissions by energy efficiency measures and international trading: a bottom-up modeling for the U.S. iron and steel sector. Applied Energy. 2014; 120: 133-146.
- 10 Assis PS, Martins BM, Vieira CB. Curso de injeção de materiais pulverizados em altos-fornos. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Minas. 2009; 1-304.
- 11 Assis PS, Martins WB, Vieira CB. Avanços na injeção de carvão pulverizado para a sua aplicação em altos-fornos. REM: Revista Escola de Minas. 2003; 56(4): 281-285.
- 12 Oliveira RP, Manetta H, Cruz JG, Maia MES, Gomes DA, Monteiro MR, Costa GB. Operação dos altos-fornos da V&M do Brasil com altas taxas de injeção de carvão pulverizado. Tecnologia em Metalurgia e Materiais. 2008; 5(2): 105-110.

- 13 Oliveira TL, Assis PS, Leal EM, Ilídio JR. Study of biomass applied to a cogeneration system: A steelmaking industry case. *Applied Thermal Engineering*. 2015; 80: 269-278.
- 14 Assis CFC. Caracterização de Biomassas para sua Injeção em Alto-Forno. Tese de Doutorado apresentada na Universidade Federal de Ouro Preto, Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT. 2014; 1-114.
- 15 Oliveira RS. Efeito da Injeção de Combustíveis Auxiliares Sobre os Parâmetros Operacionais em Altos-Fornos. Trabalho de conclusão de curso (Monografia em Engenharia Metalúrgica) apresentado na Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. 2014; 1-89.
- 16 STANDARD BS EN 14774-1:2009. Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method. Total moisture: Reference method. 2010.
- 17 STANDARD BS EN 14775:2009. Solid biofuels - Determination of ash content. 2010.
- 18 STANDARD BS EN 15148:2009. Solid biofuels - Determination of the content of volatile matter. 2010.
- 19 STANDARD BS EN 15104:2011. Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen. Instrumental methods. 2011.
- 20 STANDARD BS EN 15289:2011. Solid biofuels - Determination of total content of sulfur and chlorine. 2011.
- 21 STANDARD BS EN 14918:2009. Solid biofuels - Determination of calorific value. 2010.
- 22 Assis PS, Vieira CB, Sobrinho PJN. New developments for Powder Coal Injection into the blast furnaces. *Steel Research International*, Weinheim. 2004; 4(75): 235-239.
- 23 Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Aparelho ORSAT para análise de gases de combustão: especificação. São Paulo: CETESB. 1990; 1-7.
- 24 Gomes MLI. Avaliação da viabilidade técnica da utilização de misturas de carvão faxinal com importados para injeção em alto-forno. Dissertação de mestrado apresentada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de materiais – PPGEM. 2004; 1-111.
- 25 Machado JGMS. Estudo da reatividade e combustão de Carvões Minerais, Carvão Vegetal e misturas. Tese de Doutorado apresentada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM. 2009; 1-212.
- 26 Assis CFC, Tenório JAS, Assis PS, Nath NK. Experimental Simulation and Analysis of Agricultural Waste Injection as an Alternative Fuel for a Blast Furnace. *Energy Fuels*. 2014; 28(11): 7268-7273.
- 27 Mazzarella VNG. 2007. Jornada Madeira Energética Capim Elefante com Fonte de Energia no Brasil: Realidade Atual e Expectativas. IPT-BNDS, Rio de Janeiro; 2007.
- 28 Ângelo MM. Construção e Simulação de um Algoritmo que Permita Prever os Efeitos da Injeção de diferentes Materiais pulverizados pelas ventaneiras em altos-fornos. Dissertação de Mestrado apresentada no programa de pós-graduação em Engenharia de Materiais da Rede Temática Em Engenharia de Materiais – REDEMAT. 2013; 1-95.