

# INJEÇÃO DE MOINHA DE CARVÃO VEGETAL NO ALTO-FORNO A<sup>1</sup>

Maurício Bittencourt Marques<sup>2</sup>  
Felipe Viana Pimenta<sup>3</sup>

## Resumo

A injeção de moinha de carvão vegetal em substituição ao combustível fóssil (carvão mineral) deve ser avaliada segundo duas perspectivas diferentes, uma econômica e outra de sustentabilidade ambiental. No ponto de vista econômico, percebe-se que nos últimos anos o mercado de carvão mineral metalúrgico tem apresentado alta volatilidade e forte tendência de elevação de preços gerando grande impacto nos custos de produção do gusa e do aço. Este cenário impulsiona a busca pela substituição de carvão mineral por outros combustíveis. A outra perspectiva é ambiental. A produção de gusa em altos-fornos utilizando-se carvão mineral através da injeção e do coque acarreta a emissão de CO<sub>2</sub> e remoção de O<sub>2</sub> da atmosfera. O balanço do uso de carvão vegetal para produção de gusa apresenta o efeito inverso, ou seja, remoção de CO<sub>2</sub> e emissão de O<sub>2</sub> para a atmosfera. O presente trabalho pretende ilustrar os esforços da ArcelorMittal Monlevade no sentido de substituir parcialmente o carvão mineral de injeção por moinha de carvão vegetal na produção de gusa do Alto-Forno A (AF-A). Os bons resultados obtidos tornaram padrão a substituição de mais de 15% do carvão mineral de injeção pela moinha. Com esta prática, 188.000 t de CO<sub>2</sub> deixaram de ser emitidas para a atmosfera até abril de 2010.

**Palavras-chave:** Carvão vegetal; Injeção; Alto-forno.

## CHARCOAL FINES INJECTION IN BLAST FURNACE A FROM ARCELORMITTAL MONLEVADE

### Abstract

The injection of charcoal fines replacing fossil fuel (coal) should be evaluated under two different perspectives, economic and environmental. In an economic standpoint, it is noticed that in recent years the market for metallurgical coal has shown high volatility and strong trend of rising prices creating great impact on production costs of pig iron and steel. This scenario drives the search for the replacement of coal by other fuels. The other perspective is environmental. The production of pig iron in blast furnaces using coal and by the injection of coke leads to emission of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> removal from the atmosphere. The balance of the use of charcoal for pig iron production has the opposite effect, i.e. removing CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> emission to the atmosphere. This paper aims to illustrate the efforts of ArcelorMittal Monlevade towards partially replace coal injection by charcoal fines to produce pig iron in Blast Furnace (BF-A). Good results became standard to replace more than 15% of the coal injection charcoal fines. With this practice, 188 000 t of CO<sub>2</sub> ceased to be emitted to atmosphere until April 2010.

**Key words:** Charcoal; Injection; Blast furnace.

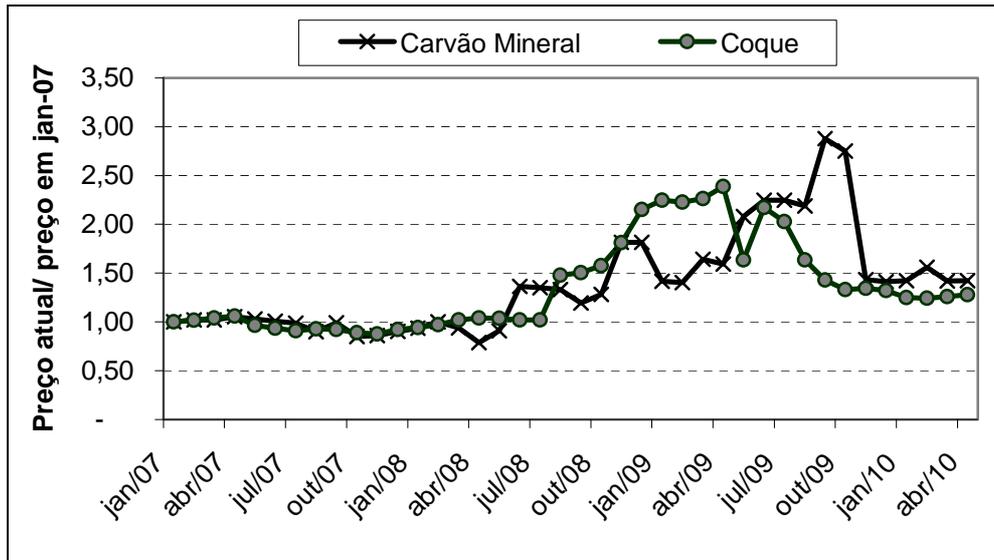
<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

<sup>2</sup> Engenheiro de Processo de Redução da ArcelorMittal Monlevade

<sup>3</sup> Engenheiro de Processo de Redução da ArcelorMittal Monlevade

## 1 INTRODUÇÃO

A injeção de moinha de carvão vegetal em substituição ao combustível fóssil (carvão mineral) deve ser avaliada segundo duas perspectivas diferentes, uma econômica e outra ambiental. No ponto de vista econômico, percebe-se que nos últimos anos o mercado de carvão mineral metalúrgico tem apresentado alta volatilidade e forte tendência de elevação de preços, conforme mostrado na Figura 1 o que gera forte impacto nos custos de produção do gusa e do aço. Este cenário impulsiona a busca pela substituição carvão mineral por outros combustíveis.



**Figura 1:** Evolução relativa dos preços do carvão mineral e do coque utilizado em Monlevade (base janeiro de 2007).

O carvão vegetal é uma opção histórica na produção de ferro gusa no Brasil. Atualmente se destaca com uma participação de aproximadamente 30% do total de gusa produzido no país. Os principais fatores que estimulam o uso de carvão vegetal na siderurgia brasileira são climáticos, de disponibilidade de terras para a agricultura, ausência de carvão mineral metalúrgico de boa qualidade e alta desenvolvimento da silvicultura no país.

A outra perspectiva é ambiental. A produção de gusa em alto-forno utilizando-se carvão mineral através da injeção e do coque apresenta uma emissão de CO<sub>2</sub> e remoção de O<sub>2</sub> da atmosfera. O balanço do uso de carvão vegetal para produção de gusa apresenta o efeito inverso, ou seja, remoção de CO<sub>2</sub> e emissão de O<sub>2</sub> para a atmosfera.

O início da injeção de moinha em Monlevade se deu em julho de 2008. Por motivos estratégicos ela foi interrompida no final de 2008 e foi retomada em junho de 2009. O presente trabalho pretende ilustrar os esforços da ArcelorMittal Monlevade no sentido de substituir parcialmente o carvão mineral de injeção por moinha de carvão vegetal na produção de gusa do Alto-Forno A (AF-A). Os bons resultados obtidos tornaram padrão a substituição de mais de 15% do carvão mineral de injeção pela moinha. Este valor equivale a aproximadamente 5% da produção de gusa da ArcelorMittal Monlevade via carvão vegetal.

## 1.1 Objetivo

A injeção de moinha de carvão vegetal no Alto-Forno A (AF-A) tem como objetivo a redução do custo de produção e a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> na produção de gusa. A esta necessidade, alia-se o fato de o grupo ArcelorMittal Longos possuir disponibilidade interna da matéria-prima.

## 1.2 Impactos das Injeções de Combustíveis nos Resultados do Alto-Forno

### 1.2.1 Impacto no custo do gusa

Os combustíveis e redutores exercem diversas funções e causam grande impacto nos principais indicadores de desempenho do alto-forno. Observa-se na Figura 2 que eles representam a maior parcela do custo do gusa produzido na usina de Monlevade.

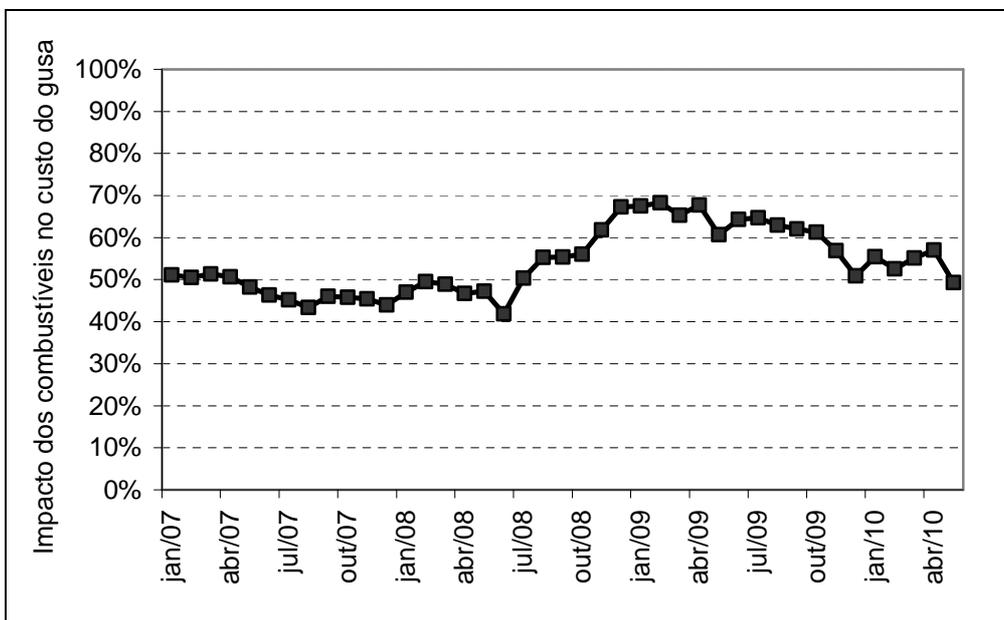


Figura 2: Impacto dos combustíveis no custo do gusa.

Devido ao elevado preço do coque e o alto custo do investimento para construção de coquearias, observa-se, nos últimos 40 anos, uma busca por substituição desta matéria-prima no alto-forno por combustíveis auxiliares como o carvão mineral, o antracito, o óleo e o gás natural. A definição pelo uso destes combustíveis em substituição ao coque passa pela avaliação mercadológica, pela disponibilidade da matéria-prima e pela avaliação do seu desempenho no processo.

Devido ao forte impacto do preço ou custo do coque no custo do gusa produzido, o *coke rate* (consumo de coque por tonelada de gusa produzido), tornou-se um dos parâmetros mais importantes de operação de um alto-forno. Ele depende de dois fatores principais: da taxa de utilização de combustíveis auxiliares e do consumo total de combustíveis por tonelada de gusa, o *fuel rate*.

### 1.2.2 Impacto em produtividade

Outro importante indicador de desempenho, a produtividade, que sofre grande impacto do mix de combustíveis utilizado. Este impacto se dá pelo enriquecimento do ar soprado com oxigênio, sendo que a injeção de carvões causa uma queda na temperatura de chama tornando-se possível a elevação do enriquecimento e pela

permeabilidade do leito à passagem de fluidos, gás e líquidos. Normalmente, com injeção se consegue ganhos acima de 10% em produtividade, comparado à operação *all coke*.

### 1.2.3 Impacto na qualidade do gusa

Por fim, a qualidade do gusa pode também ser afetada pela composição do mix de combustível utilizado. O enxofre e o fósforo são os principais elementos indesejáveis nos aços, que estão presentes nos combustíveis. Os tratamentos necessários para a eliminação destes elementos do gusa ou do aço onera o processo impactando o custo final do produto.

## 1.3 Efeito da Qualidade dos Carvões na Operação de um Alto-forno

Observa-se que tipos diferentes de carvão afetam a operação de um alto-forno de forma distinta. O desempenho de um carvão no alto-forno depende da taxa de injeção praticada, da condição de combustão, e das características do carvão.

Defendi<sup>(1)</sup> fez uma grande revisão sobre o tema e indica como as principais características dos carvões que afetam a estabilidade da operação de um alto-forno são a combustibilidade do carvão e das características do char que é o material não queimado na zona de combustão, formado por carbono e cinzas. Este char irá combinar com a escória descendente da zona de amolecimento e fusão podendo causar uma piora das condições de permeabilidade ocasionando, em última análise, engaiolamentos e colapso de ventaneiras.

O mecanismo de combustão do carvão de injeção está em grande parte ligado ao teor de materiais voláteis presente no carvão. Analisando somente este aspecto, um teor mais elevado de materiais voláteis leva a uma maior eficiência de combustão. Porém, para alguns autores, essa diferença não é muito representativa após determinada distância da ventaneira, ainda na zona de combustão. Os resultados práticos na usina de Monlevade coincidem com esta visão. Inclusive, na maioria dos casos, carvões baixo voláteis apresentam bons resultados operacionais no AF-A.

As características do char, formado pelas cinzas e pelo carbono não reagido, e a sua combinação com a escória exercem importante papel na operação dos altos-fornos. As cinzas geradas na combustão do carvão afetam a viscosidade da escória na região próxima a ventaneira. De maneira geral, a viscosidade da escória aumenta com o teor de alumina e diminui com o teor de MgO. A basicidade também tem grande influência na basicidade. Para escórias básicas o aumento da basicidade eleva a viscosidade de uma escória. Escórias ácidas, porém apresentam um valor de mínimo, a partir do qual a redução da basicidade eleva a viscosidade.

## 1.4 A Moinha de Carvão Vegetal X o Carvão Mineral

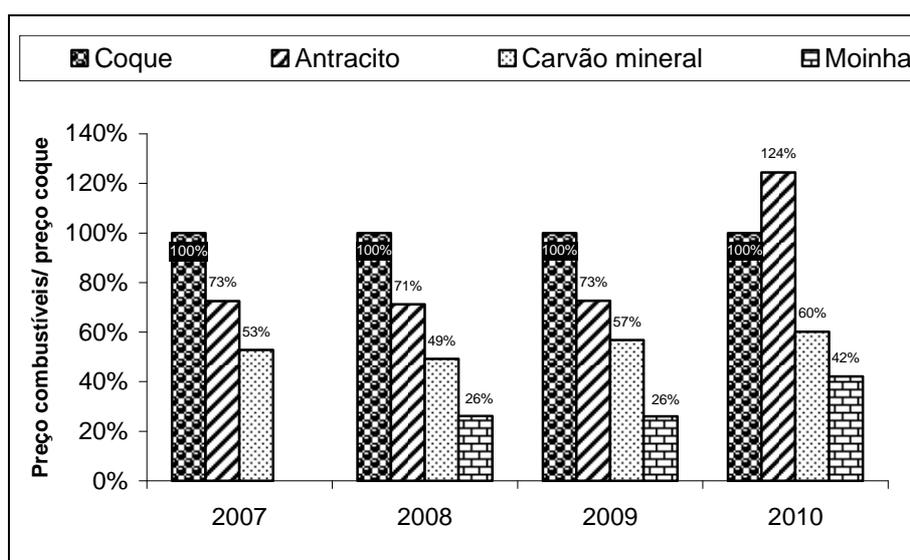
A moinha de carvão vegetal é injetada no AF-A em substituição ao carvão mineral. Na Tabela 1 podemos comparar os principais parâmetros de qualidade da moinha de carvão vegetal com os principais tipos de carvão mineral utilizados na usina de Monlevade.

**Tabela 1.** Comparação entre os parâmetros de qualidade da moinha de carvão vegetal e carvões minerais

Parâmetro	C. mineral S (%)	C. mineral C (%)	C. vegetal AMJF (%)
Carbono fixo	77,12	75,53	66,55
Cinza	8,76	9,96	13,49
Matéria volátil	14,12	14,51	19,96
Umidade	7,55	9,42	5,93
HGI	87	82	61,0
Densidade (t/m <sup>3</sup> )	0,718	0,709	0,308
Enxofre	0,35	0,29	0,04
Taxa de substituição	0,86	0,85	0,70
<b>Composição das cinzas</b>			
	C. mineral S (%)	C. mineral C (%)	C. vegetal AMJF (%)
SiO <sub>2</sub>	41,70	46,50	20,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,50	34,20	9,55
CaO	5,40	3,52	35,76
MgO	0,98	0,97	10,18
Na <sub>2</sub> O	0,6	0,87	0,2
K <sub>2</sub> O	0,86	1,85	1,15

A taxa de substituição depende da composição química de cada tipo de combustível. Existem diversas formas de cálculo da taxa de substituição. A fórmula utilizada em Monlevade leva em consideração as porcentagens de carbono, hidrogênio, cinzas, nitrogênio e oxigênio.

Destaca-se na Tabela 1 o menor teor de carbono da moinha o que leva a uma taxa de substituição inferior à dos carvões minerais. Em relação aos carvões minerais utilizados no ano de 2008 esta taxa é de 83% em média. Na Figura 3 podemos observar um comparativo dos preços dos combustíveis utilizados no AF-A nos últimos anos considerando-se a taxa de substituição de coque.



**Figura 3:** Comparativo dos preços de combustíveis utilizados no AF-A considerando-se a taxa de substituição em relação ao coque.

Podemos perceber que no ano de 2010 a moinha representa 42% do custo do coque e 70% do custo do carvão mineral levando-se em consideração a taxa de substituição.

O impacto do uso da moinha na qualidade do gusa é positivo. O input de enxofre reduz em 4% com a injeção de 20%. A redução do teor de enxofre leva a uma redução de custos com desulfuração através de uma redução do volume ou da basicidade da escória ou com um menor consumo de dessulfurante.

Conforme descrito na seção anterior, para a boa operação do alto-forno, duas características são muito importantes nos carvões, a combustibilidade e o efeito do seu char na escória formada. A combustibilidade é função do teor de voláteis. Por este lado o carvão vegetal apresenta uma vantagem em relação aos carvões minerais mais utilizados em Monlevade.

A composição das cinzas da moinha também é muito favorável em relação aos carvões minerais substituídos. Seu baixo teor de alumina e elevado teor de Cão e MgO contribuem para uma melhor viscosidade da escória e conseqüente permeabilidade na região a frente da zona de combustão.

Um outro ponto, a elevada reatividade da moinha é um fator que exige um cuidado redobrado. O risco de incêndio do material pode colocar em risco a segurança dos trabalhadores, pode ocasionar danos aos equipamentos e queimar correias transportadoras além da perda de material.

A baixa densidade da moinha em relação ao carvão mineral é um fator de extrema importância. Em planta de moagem e secagem da moinha, a baixa densidade da moinha gera uma maior dificuldade de operação de limpeza das mangas do filtro de processo. Além disso, esta diferença de densidade faz com que se tenha uma segregação do material quando estocados e transferidos em conjunto.

### 1.5 Impactos Ambientais na Substituição do Carvão de Injeção por Moinha

O uso de moinha de carvão vegetal é ambientalmente sustentável. Uma tonelada métrica de gusa produzida com coque emite para a atmosfera 1,9 t de CO<sub>2</sub> e remove 1,2 toneladas de O<sub>2</sub>. Comparativamente, Uma tonelada métrica de gusa produzida com carvão vegetal retira da atmosfera 1,1 t de CO<sub>2</sub> e produz 164 quilos de O<sub>2</sub>. O benefício total é de 3 tons de CO<sub>2</sub> para cada tonelada de gusa produzida com carvão vegetal.

Segundo a fundação *Trees for the Future*, uma árvore plantada em clima tropical seqüestra aproximadamente 22 kg de CO<sub>2</sub> por ano em um período de vida de 40 anos. Isto equivale a 880 kg de CO<sub>2</sub> absorvidos durante o seu período de vida. Desta forma, calcula-se que uma tonelada de gusa produzida com carvão vegetal ao invés de coque equivale à plantação de 3,4 árvores.

A disponibilidade de moinha no grupo surgiu com a construção de dois altos-fornos a carvão vegetal na usina da ArcelorMittal Juiz de Fora. A geração de finos no peneiramento do carvão representa 31% em peso do total de carvão vegetal que chega até a usina. A injeção da moinha em Juiz de Fora se iniciou em fevereiro de 2008. Atualmente a taxa de injeção está em torno de 110 kg/t. Este balanço gera um excedente de 90 t/dia de moinha.

## 2 METODOLOGIA

Após revisão bibliográfica do tema, o uso da moinha de carvão vegetal no AF-A foi testado através de banca técnica na proporção de 10% do mix de injeção. O teste

objetivou avaliar os impactos em segurança, estocagem, meio ambiente, manuseio, moagem, injeção e desempenho do processo do AF-A. Após aprovação da banca técnica o uso da moinha foi incorporado à rotina da área de redução da ArcelorMittal Monlevade.

### 3 DESENVOLVIMENTO

A moinha gerada no peneiramento de Juiz de Fora, após transporte rodoviário até João Monlevade, passa por diferentes etapas até ser finalmente injetada no AF-A. Na Figura 4 observa-se este trajeto.

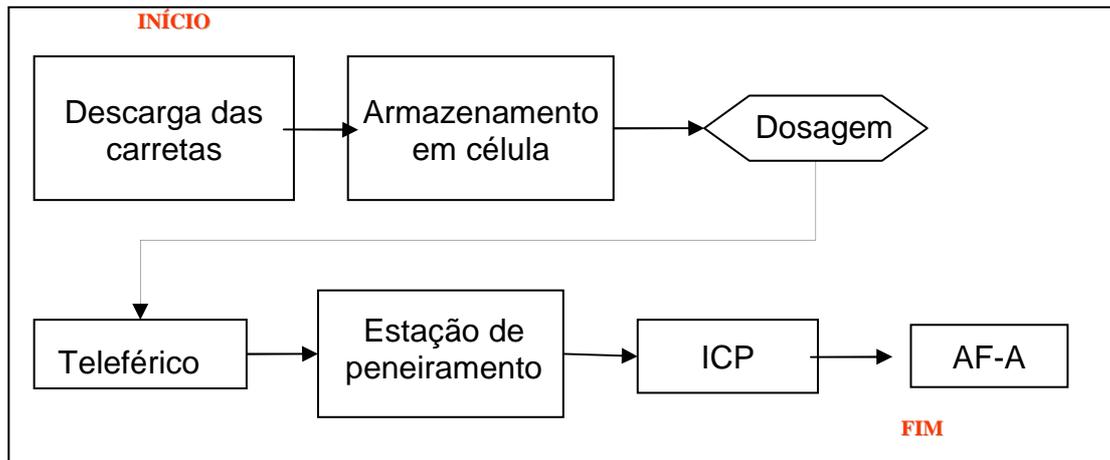


Figura 4: Fluxograma da injeção da moinha de vegetal no AF-A.

#### 4.1 Transporte e Manuseio

A moinha é carregada em Juiz de Fora, diretamente de silos de estocagem, em carretas que realizam o transporte rodoviário até Monlevade.

A recepção e manuseio da moinha em Monlevade seguem um procedimento específico que visa em primeiro lugar garantir a saúde e segurança dos funcionários envolvidos na operação. A norma de combate a incêndios foi revisada e todo o pessoal envolvido treinado.

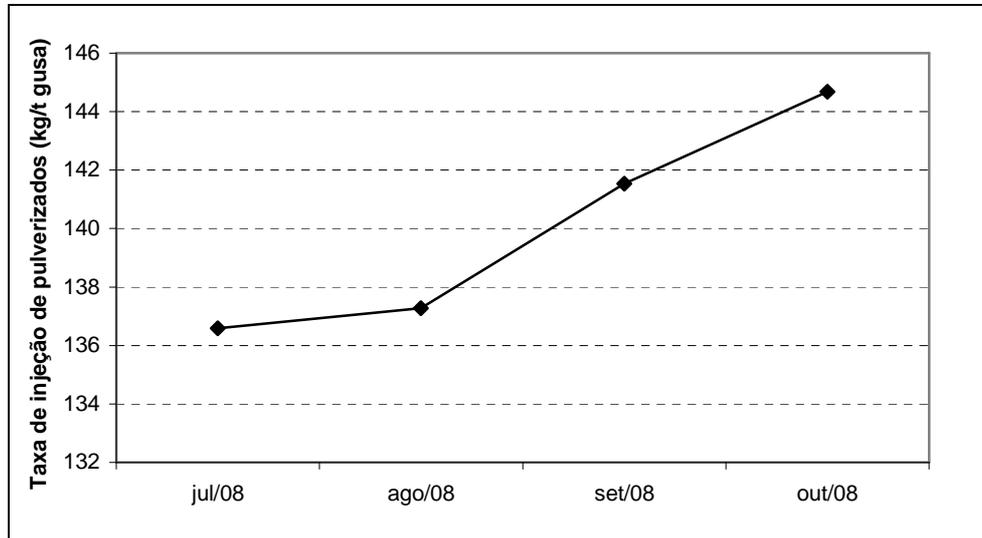
A transferência para a instalação de moagem e secagem é feita de acordo com a porcentagem determinada pela equipe do alto-forno até o silo de carvão bruto. Porém a usina de Monlevade não dispõe de uma instalação de dosagem de carvões. A transferência é calculada de hora em hora pela medição do peso do material na correia por unidade de comprimento para a moinha e para o carvão mineral. Este procedimento pode levar a dosagem inadequada além de não permitir um controle de rastreabilidade adequado para a transferência.

#### 4.2 Moagem e Secagem

Devido à baixa densidade da moinha (0,31 t/m<sup>3</sup>) e ao reduzido valor de HGI (61), a moagem e a secagem do material tornam-se críticas para o processo. O baixo HGI da moinha pode levar a redução da produtividade do moinho e a um maior desgaste do moinho.

Já a baixa densidade da moinha leva um problema para na classificação e manuseio do material. A utilização 10% de moinha no mix de injeção eleva o volume em 7% o volume de material. Variações na dosagem podem, em alguns momentos, levar a

uma transferência volumétrica maior do que a rosca sem fim é capaz de manusear, levando a um enchimento do filtro e parada da planta devido a alta diferença de pressão no filtro. Para se controlar este efeito, foi implantado um procedimento que, através da redução do fluxo de gás de arraste na planta reduza a quantidade de material transferido. Os resultados podem ser verificados na Figura 5.



**Figura 5:** Evolução da taxa de injeção de pulverizados após o início da utilização da moinha de carvão vegetal.

#### 4.2 Resultados e Efeitos no Alto-forno

A Figura 6 mostra a taxa de injeção de moinha de carvão vegetal praticada desde o início da sua injeção no AF-A. Vale lembrar que o início da injeção de moinha em Monlevade se deu em julho de 2008. Por motivos estratégicos ela foi interrompida no final de 2008 e foi retomada em junho de 2009. Para a análise dos resultados deve-se ter em mente que o período apresenta uma heterogeneidade muito grande com relação ao tipo de operação (*all coke*, injeção com 120 kg/t, injeção de 150 kg/t), tipo de carga metálica (com e sem pelotas, proporção de sinter variando de 80% a quase 100%).

Durante o período, a injeção de moinha não afetou a estabilidade da operação do AF-A. A permeabilidade não sofreu alteração mesmo durante o uso de taxas elevadas de injeção.

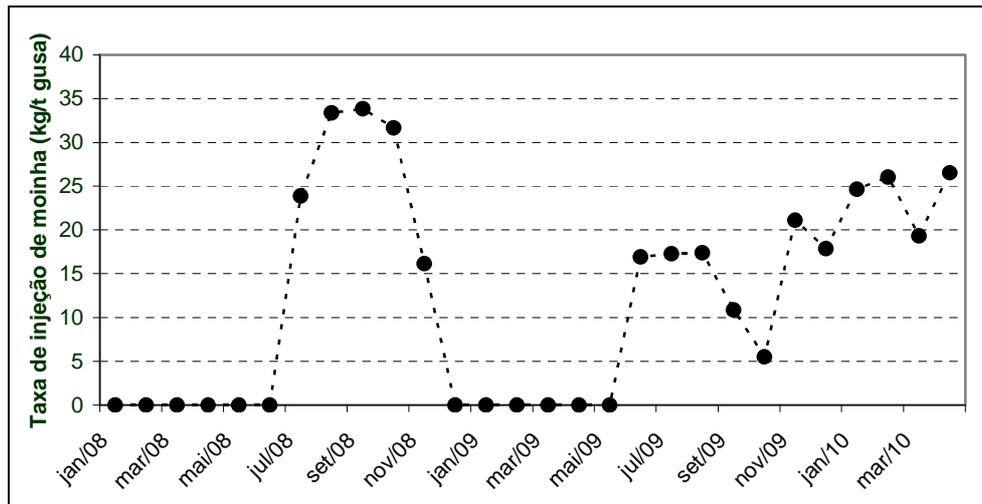


Figura 6: Média mensal da taxa de injeção de moinha no AF-A.

Utilizou-se taxas de até 35 kg/t de moinha. Porém, foi possível perceber que taxas acima de 30 kg/t afetam fortemente a produção de finos na instalação de secagem e moagem. Como em Monlevade uma das limitações a injeção é a moagem e secagem do material, atualmente adota-se taxas em torno de 20 kg/t a 25 kg/t. Isto equivale a mais de 15% de todo o material injetado no AF-A.

O impacto do uso da moinha na operação do alto-forno foi relativamente pequeno. Apesar de ter sido detectada uma pequena elevação no *fuel rate* quando injetando moinha, esta não foi expressiva. A Figura 7 mostra evolução do *fuel rate* no período aonde a moinha foi injetada. Não é possível perceber uma correlação entre o uso de moinha e o *fuel rate* e pela análise do período verifica-se que outros fatores foram preponderantes para a variação do *fuel rate*.

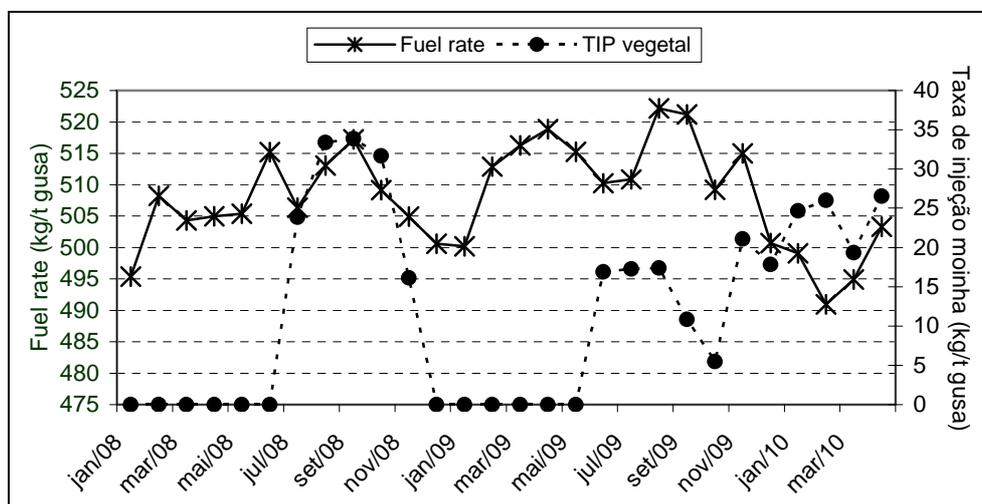
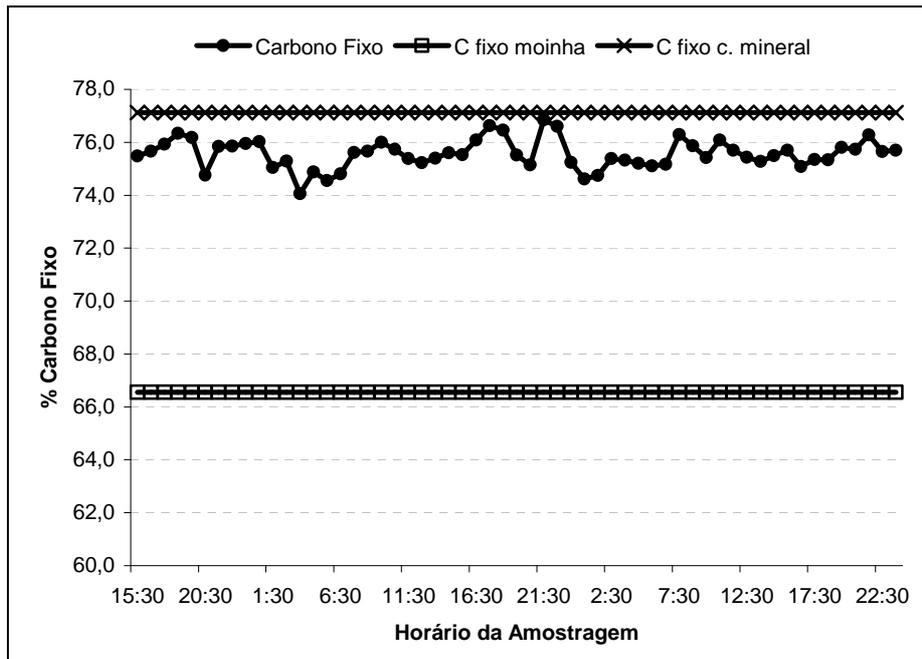


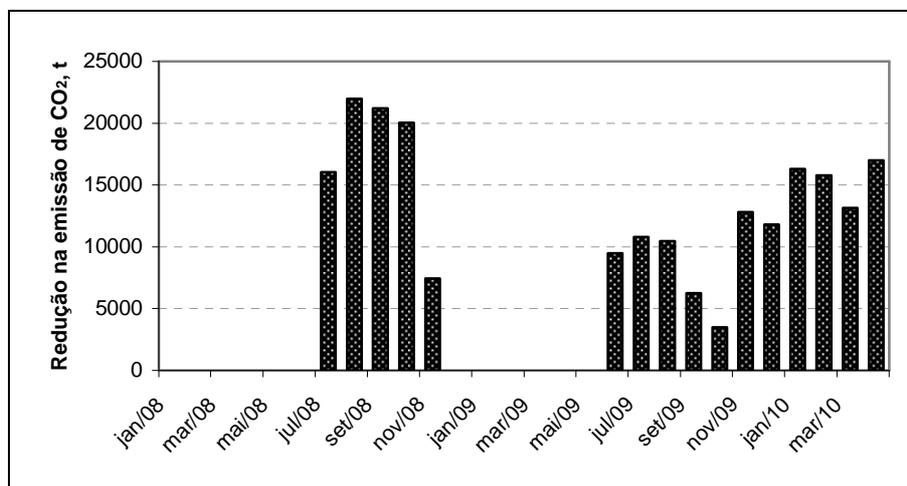
Figura 7: Evolução do *fuel rate* no período de injeção de moinha.

Um ponto que merece uma atenção no uso de materiais diferentes para a injeção é um possível descontrole térmico devido a variação nas proporções. Para avaliar este grau de variação, realizou-se uma amostragem de hora em hora durante 3 dias do material nas ventaneiras do AF-A. O resultado se encontra na Figura 8.



**Figura 8:** Carbono fixo da mistura injetada no AF-A

É possível perceber variações de até 2% em um período de 2 horas. Esta variação não é muito pronunciada, mesmo em se tratando de dois materiais tão diferentes. Com relação às emissões, os ganhos foram expressivos. A Figura 9 mostra a redução mensal na emissão de CO<sub>2</sub> quando da injeção de moinha. Até o mês de abril de 2010, 188.000 t de CO<sub>2</sub> deixaram de ser emitidas na produção de gusa no AF-A. Isto equivale a plantação de 214.000 árvores ou 214 equitares de floresta tropical.



**Figura 9:** Redução das emissões de CO<sub>2</sub> na produção de gusa em Monlevade.

## 5 CONCLUSÃO

O uso da moinha de carvão vegetal demonstrou-se viável do ponto de vista de processo, ambiental e econômico.

Como esperado pela análise das características do carvão, o processo do AF-A não apresentou problemas com o uso de moinha. Por outro lado, demonstrou-se que a moinha apresenta um efeito maléfico na produtividade da planta de moagem e



secagem. Em Monlevade esta é a barreira para se utilizar a moinha em proporções mais elevadas.

Desde o início da injeção de moinha de carvão vegetal no Alto-Forno A até o mês de abril de 2010, 188.000 t de CO<sub>2</sub> deixaram de ser emitidas na produção de gusa no AF-A. Isto equivale à plantação de, no mínimo, 214.000 árvores de floresta tropical. A substituição de carvão por moinha mostrou-se sustentável também do ponto de vista econômico trazendo junto um outro ganho que é a redução da dependência do fornecimento de carvão mineral importado.

Não houve nenhuma ocorrência de acidentes como o manuseio e estocagem da moinha devido à utilização de procedimentos e métodos adequados para o fim.

## REFERÊNCIAS

- 1 DEFENDI, G. A. Caracterização da Cinética de Reação e Comportamento das Cinzas dos Carvões Minerais Injetados Através das Ventaneiras dos Altos-Fornos da CST. Belo Horizonte. UFMG. Abril/ 2006.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 BABICH, A. et alii – Charcoal Behaviour by Its Injection into the Modern Blast Furnace. ISIJ International, vol. 50, n.1, p. 81-88, 2010.
- 2 GEERDES, M. O. et alii – Práticas modernas para operação de alto-forno. Outubro de 2007
- 3 ISHII, K. – Advanced pulverized coal injection technology and blast furnace operation. Pergamon. Oxford, 2000.