

# AVALIAÇÃO DO USO DE MISTURA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM CARVÃO VEGETAL PARA INJEÇÃO NAS VENTANEIRAS DO ALTO-FORNO<sup>1</sup>

Janaína Solvelino Brum<sup>2</sup>

Thiago Lucas da Silva<sup>3</sup>

Eric Rafael dos Reis<sup>3</sup>

Natália Carolina da Silveira<sup>4</sup>

Paulo Santos Assis<sup>5</sup>

## Resumo

O trabalho apresentado visa estudar as alternativas de misturas de bagaço de cana-de-açúcar ao carvão vegetal para injeção nas ventaneiras do alto-forno. Foram feitas seis misturas do carvão vegetal variando os percentuais 20%, 40%, 60%, 80% e, finalmente 100% de bagaço de cana-de-açúcar. O bagaço já é utilizado para geração de energia térmica em caldeiras, como fonte de energia elétrica, e agora esta sendo estudada uma possível utilização na injeção de materiais pulverizados em altos-fornos. O uso de combustíveis renováveis para a produção de ferro primário vem sendo muito discutido nos últimos tempos, visando uma produção siderúrgica ambientalmente sustentável. Neste sentido, o uso de biomassa como agente combustível e redutor na etapa de redução, parece ser uma eficiente rota para produção de ferro primário de maneira econômica e ambientalmente sustentável. Isto porque, a partir da substituição do uso de combustíveis fósseis por biomassas, obtém-se um ciclo fechado de geração e captura de CO<sub>2</sub>.

**Palavras-chave:** Bagaço de cana-de-açúcar; Injeção; Energia; Meio ambiente.

## EVALUATION OF MIXTURES OF SUGAR CANE BAGASSE AND CHARCOAL TO INJECT IN THE BLAST FURNACE TUYERES

### Abstract

This paper shows the possibilities for using mixtures of sugar cane bagasse and charcoal for injecting into tuyeres of blast furnaces. Mixtures varying by 20 % from 0 till 100 % of charcoal in these have been done. The Bagasse can be used for energy generation to produce steam, as electrical main source, and now it is proposed a possible use to be considered in powder to be injected into blast furnaces.. The main advantage is under the point of view of Environment, but in some cases and time, can be a good opportunity to reduce the cost for producing hot metal. Based on this idea, it is proved that fossil fuels can be partially substituted using this biomass, giving the concept of zero consumption and generation of CO<sub>2</sub>. That means reducing the Green House Effect.

**Key words:** Sugar cane bagasse; Injection; Energy; Environment.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 30° Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 24° Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 19 a 21 de agosto de 2009, São Paulo, SP

<sup>2</sup> Membro da ABM. Graduando em Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas-UFOP, Brasil.

<sup>3</sup> Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista da Escola de Minas-UFOP, Brasil

<sup>4</sup> Membro da ABM. Graduanda em Química Industrial do Instituto de Ciências Exatas e Biológicas da UFOP, Brasil

<sup>5</sup> Membro da ABM. Prof. Titular da Escola de Minas-UFOP, Prof. Honorário da Hebei Technology University, China. Pesquisador em Meio-ambiente, Siderurgia e Qualidade. Dr., M.Sc.

## **1 INTRODUÇÃO**

A energia é um elemento indispensável para o desenvolvimento econômico e social da humanidade. Em escala mundial, a energia consumida pelo homem provém em aproximadamente 80%, de combustíveis fósseis (carvão, petróleo, e gás natural). Não se pode esquecer que os combustíveis fósseis quando queimados nas termelétricas, nos transportes, nas indústrias, liberam gases altamente tóxicos e poluentes (gás carbônico, óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre, entre outros), esses gases são os grandes responsáveis pelos impactos ambientais, que chegam a colocar em risco a própria sobrevivência da raça humana. A introdução do conceito de sustentabilidade energética aponta para o uso cada vez mais crescente das fontes limpas e renováveis de energia (biomassa, eólica, solar). Hoje, existe um consenso internacional para reduzir as emissões destes gases poluentes, através da redução do consumo dos combustíveis fósseis, o Protocolo de Kyoto, assinado em 1997, é uma prova disso. Desta forma, a presente contribuição técnica mostra o estado atual da tecnologia de geração de energia a partir da cana-de-açúcar no Brasil, bem como aspectos relativos à geração de resíduos, características da biomassa produzida e a sua possível aplicação como fonte de energia e redução em altos-fornos que praticam Injeção de Carvão Pulverizado.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Bagaço de Cana-de-Açúcar e Energia**

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, esta é aproveitada pela indústria sucro-alcooleira principalmente para o fornecimento da energia demandada nos processos de fabricação de açúcar e do álcool, seja sob a forma térmica (vapor de processo), mecânica (para o funcionamento das moendas) ou elétrica. Esta proporciona às empresas sucro-alcooleira o privilégio da auto-suficiência em energia elétrica, condições essas inexistentes na maioria das atividades industriais. Estima-se que o bagaço possa gerar cerca de 100 kwh/tonelada de cana-de-açúcar e que em 2012 o país poderá produzir 24.000 MW de energia elétrica. Isto é decorrente do fato de que a cana-de-açúcar representa o primeiro produto agrícola mais cultivado no Brasil em 2007 (Figura 1).

Cerca de 85% da produção brasileira de cana de açúcar concentra-se nas regiões Centro-Oeste, Sul, Sudeste, sendo os 15% restantes produzidos no Norte, Nordeste. A Figura 2 mostra a distribuição da cana de açúcar por estados e regiões brasileiras respectivamente. São Paulo, Minas Gerais, Alagoas e rio de Janeiro são responsáveis pela produção de mais de 80 % de toda cana no país.

O país tem duas regiões produtoras com safras alternadas, podendo manter sua presença no mercado mundial ao longo de todo o ano. Na região Sudeste é plantada de outubro a março e colhida de maio a outubro e na região Nordeste, de julho a novembro e colhida dezembro a maio.

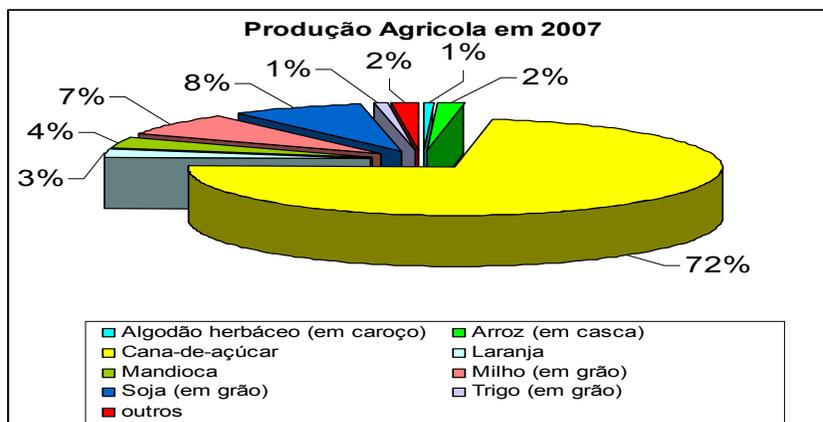


Figura 1: Produção agrícola do Brasil em 2007.<sup>(1)</sup>

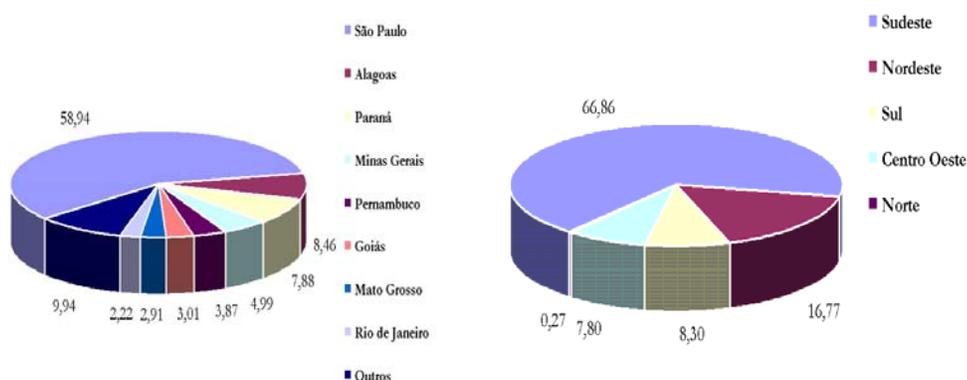


Figura 2: Distribuição da produção de cana-de-açúcar no Brasil por Estados.<sup>(2)</sup>

A produção de cana no Brasil esta crescendo ao longo dos anos, como mostra a Figura 3. Durante os últimos dezesseis anos, a produção de cana de açúcar simplesmente dobrou.

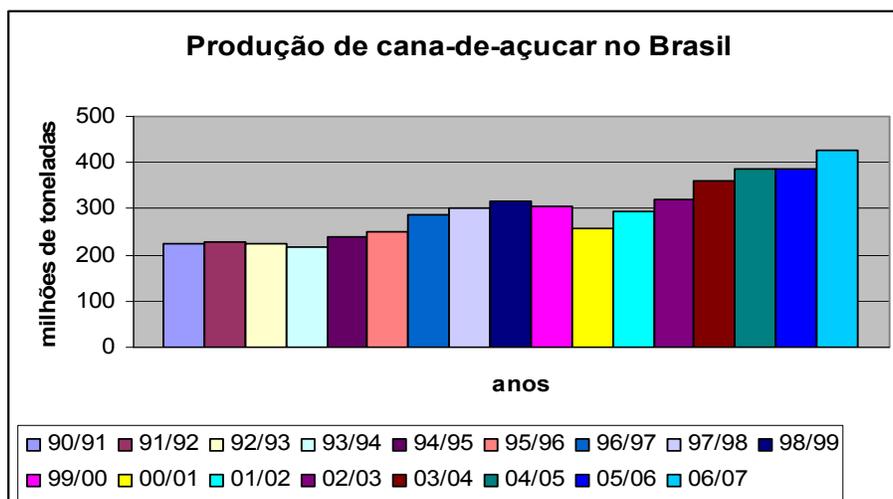


Figura 3: Produção de cana no Brasil.<sup>(3)</sup>

A cana é plantada em vários estados brasileiros, estimando-se em 5,5 milhões de hectares a área colhida em 2004.<sup>(3)</sup> A produção de cana-de-açúcar no Brasil, durante a colheita 2007-2008, deve atingir um número recorde de 425 milhões de toneladas, com crescimento no campo açucareiro e de álcool. Já se estima que em 2012 a produção possa chegar a 730 milhões de toneladas. A estimativa de expansão da área de cana-de-açúcar no Brasil, se confirmada, significa mais que dobrar a área atual nos próximos 10 anos, devido ao crescimento da produtividade dos canaviais.

Da moagem de uma tonelada de cana, a usina produz, em média, 153 quilos de melaço (açúcar e etanol), 165 quilos de palha e 276 quilos de bagaço. Essa matéria-prima é abundante, de baixo custo e esta disponível em grandes quantidades no país.

No ano 2005 o preço do bagaço de cana era comercializado a R\$40,00 a tonelada, preço maior do que a tonelada de cana que está em R\$30,00. Segundo a revista semanal Veja, edição 2042, até 2010 o único produto agrícola que não subirá de preço é a cana de açúcar.

O bagaço da cana-de-açúcar é o resíduo industrial lignocelulósico fibroso, remanescente do esmagamento dos colmos da cana-de-açúcar no dispositivo de moagem para extração do caldo da cana. Constitui-se em um conglomerado de partículas bastante heterogêneo resultado do próprio processo de moagem. Tem-se consolidado como uma matéria-prima industrial de elevada importância econômica. Segundo sua natureza, o bagaço é uma biomassa fibrosa que contém, em base seca, as seguintes substâncias, identificadas na Figura 4.

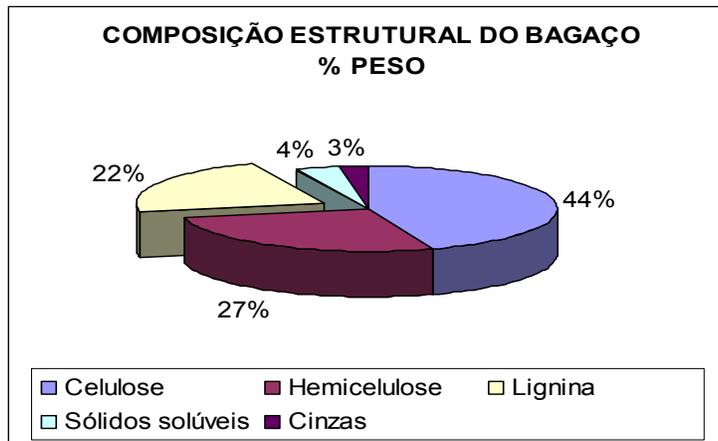


Figura 4: Composição estrutural do bagaço.<sup>(4)</sup>

A lignina é um polímero tridimensional amorfo encontrado nas plantas terrestre, cuja função é de conferir rigidez. Diz-se que quanto maior o teor de lignina, maior é a chance de se produzir um carvão vegetal de boa qualidade. A comparação do poder calorífico inferior do bagaço e outros combustíveis pode ser observada na Tabela 1 e sua equivalência correspondente na Tabela 2. O poder calorífico do bagaço da cana de açúcar é função da umidade e do açúcar, como o teor de açúcar é normalmente baixo, tem-se a umidade como fator limitante do poder calorífico. Naturalmente uma forma de se elevar o poder calorífico do bagaço é a sua secagem. É evidente que o seu uso em qualquer processo vai depender da fonte alternativa que se tem para a sua secagem. Para alguns casos onde for possível a sua secagem sem consumo adicional de energia, é altamente vantajosa, pois o PCI é inversamente proporcional ao teor de

umidade detectado no mesmo. Casos em que se exige consumo de energia nova para a secagem do bagaço deverão ser analisados sob o ponto de vista de custo/benefício.<sup>(4)</sup>

**Tabela 1 - Comparação entre o bagaço e outros combustíveis<sup>(4)</sup>**

Material	Poder calorífico (PCI)	
	kcal/kg *	MJ/kg **
Óleo BPF	9.500 *	39.748 **
Bagaço 50% Umidade	1.800	7531,2
Bagaço 48% Umidade	2.250	9414

*kcal/kg \* MJ/kg \*\**

**Tabela 2- Equivalência do bagaço<sup>(4)</sup>**

Massa de bagaço (kg)	Massa/Volume Material
5,3	1 kg de Óleo BPF
320	1 m <sup>3</sup> de lenha

O bagaço da cana dentre as biomassas é aquela que reúne os melhores atributos econômicos para ser industrializado e competir comercialmente com o óleo combustível em virtude das seguintes vantagens, terem lavouras organizadas, cujos custos são debitados no produto nobre: açúcar e/ou álcool e ser produzidos em grandes quantidades, concentradas em um ponto.

A umidade do bagaço interfere diretamente no rendimento da combustão, o que se constata pela temperatura de ignição que está entre 500°C e 600°C com 50% de umidade, caindo para 300°C a 400°C com 35% a 40% de umidade. A temperatura de chama também é sensível ao nível de umidade, ficando entre 850°C e 920°C com 50% de umidade, mas chegando acima de 1.100°C com 35% de umidade. Este processo de combustão que é aqui retratado considera que a entrada de ar se dá à temperatura ambiente.

Apesar de o bagaço apresentar um alto teor de umidade, é responsável pela boa ignição do resíduo por possuir um alto teor de voláteis, da ordem de 87% em base seca. Os voláteis do bagaço representam 78% do poder calorífico e consomem 74% do ar de combustão.

## 2.2 Injeção de Carvão Pulverizado

Sabe-se que a tecnologia de injeção de carvão pulverizado tem sido praticada no mundo inteiro. Atualmente, existem mais de 400 altos-fornos que praticam esta técnica, sendo que em mais de 70% de todos os altos-fornos no mundo já se usa algum tipo de injeção de materiais sólidos. No caso específico do carvão vegetal, o Brasil detém a tecnologia, sendo inicialmente desenvolvida pela Acesita, ainda nos idos de 1970, sendo que, para usinas integradas, todos os altos-fornos a carvão vegetal já injetam esse redutor em suas ventaneiras. Todos os altos-fornos do mundo já injetam carvão mineral pulverizado.<sup>(5)</sup>

As principais variáveis que levaram ao crescimento vertiginoso do número de instalações de injeção ocorrido a partir do início da década de 1980 estão relacionadas com a redução do custo de produção de gusa, substituição do óleo combustível, aproveitamento de resíduos, qualidade do ferro gusa, injeção de outros materiais tais

como: finos de minério, fundentes, plásticos, papel e outros, como descritos na literatura.<sup>(3-5)</sup> É claro que a injeção de carvão pulverizado (ICP) deve implicar reduções significativas no custo de produção de gusa. Nesse aspecto, é fundamental que maiores taxas de injeção sejam praticadas, com ganhos significativos no consumo de redutor carregado pelo topo do alto-forno. Normalmente, quando se injetam maiores taxas de ICP, acima de 180 kg/t ~ 200 kg/t gusa, não existe ganho proporcional no consumo de redutor. Assim, esforços no sentido de se aumentar a taxa de combustão do carvão pulverizado certamente afetarão a taxa de injeção, aí, sim, haveria ganhos financeiros na produção de gusa.<sup>(5)</sup>

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização do Bagaço de Cana-de-açúcar

Como comentado anteriormente, foram recolhidos cerca de 30 kg de bagaço de cana-de-açúcar em uma unidade de produção de álcool em Rio Casca, perfazendo cerca de dois sacos de 80 l cada. Este material foi recolhido aleatoriamente no campo, quando o mesmo já estava depositado. Posteriormente foram feitas algumas visitas a Campo Belo, MG, para ver o sistema de disposição do mesmo resíduo em algumas usinas de produção de aguardente do município constatando-se a semelhança dos processos de disposição. A Figura 5 ilustra uma foto de onde foi retirada a amostra.



**Figura 5:** Disposição do bagaço de cana-de-açúcar no pátio da usina.<sup>(4)</sup>

O material foi levado para a UFOP e feita a cominuição do mesmo usando um pulverizador laboratorial típico usado em laboratórios de preparação de minério-de-ferro. Após a sua pulverização, foi feita uma análise imediata do material que identificar o teor de carbono fixo e a quantidade de voláteis. Estes dados foram comparados com resultados de literatura sobre o assunto. Também foi separada uma amostra < 150 # para determinação de seu PCI.

### 3.2 Caracterização do Carvão Vegetal

As amostragens foram feitas após o sistema de moagem, secagem e misturas de carvões vegetais do ICP, ou seja, não levou em consideração a sua procedência. A norma NBR6923 (Carvão vegetal – Amostragem e preparação de amostra, de 1981) da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) foi utilizada para proceder às amostragens. Estas foram quarteadas e separadas na quantidade de 150g por amostra. As amostras foram identificadas, levando em consideração sua análise química imediata (C1, C2 e C3), granulométrica (G1, G2 e G3), umidade (U1, U2 e U3) e fonte (AP) Elas foram armazenadas em recipientes de vidro devidamente preparados e identificados para recebê-las. Para determinar a granulometria média, a norma utilizada é a ABNT NBR7402 (Carvão vegetal – Análise granulométrica, de 1982). Por outro lado, usou-se a norma ABNT NBR8112 (Carvão vegetal – Análise imediata, de 1986) para a determinação da análise imediata, em base seca.<sup>(2)</sup> As amostras procederam da Gerdau e da Gusa Nordeste, esta última localizada em Açailândia.

A utilização do BET (o nome deriva das iniciais dos nomes dos cientistas que a propuseram: Brunauer, Emmet & Teller), que é um método para determinar a porosidade de grãos, proporcionou a determinação de várias propriedades físicas. Destaque para, superfície específica, volume total de poros e volume de microporos das amostras.

### 3.3 Simulador de Elevado Gradiente Térmico

Inicialmente as amostras de carvão vegetal devidamente identificadas foram pesadas em balança analítica para compor uma amostra que simula 50 kg/tgusa, 80 kg/tgusa e 140 kg/tgusa de acordo com a prática de algumas empresas. As amostras são colocadas com a ajuda de uma espátula em um recipiente de vidro devidamente desumidificado com auxílio de acetona, então esta é levada para o simulador, na Figura 6 vê-se um esquema deste simulador e suas respectivas zonas. O gás utilizado neste experimento é oxigênio puro estocado em cilindros de 13 m<sup>3</sup> cada, este é acoplado ao simulador através de mangueiras devidamente dimensionadas para tal finalidade. Com o auxílio de um funil de vidro, o carvão é introduzido na abertura denominada “S” que após isso é fechada para que não ocorra à ejeção do material, cada forno está previamente aquecido à temperatura de 800<sup>0</sup>C para o forno de pré-aquecimento e acima de 1.200<sup>0</sup>C para o forno de combustão.

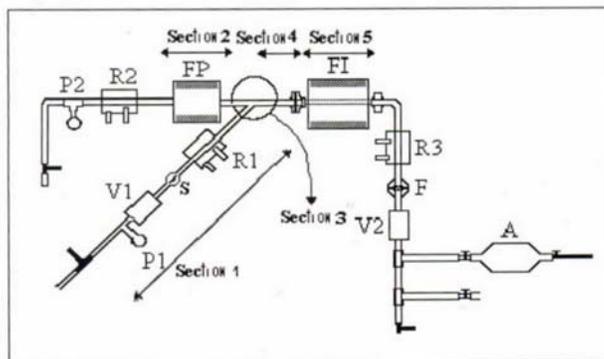


Figura 6: Esquema das regiões do simulador. <sup>(5)</sup>

Após aberta a válvula do cilindro, o gás é destinado para um ramo da mangueira que o conduz ao forno de pré-aquecimento e outro que o conduz para a lança de injeção no forno de pré-aquecimento onde ele é aquecido para a temperatura de sopro similar a atingida em um alto-forno. Na lança de injeção o gás arrasta o material particulado sob o comando da válvula eletromagnética (V1) que é acionada simultaneamente com a válvula (V2) por apenas 2 segundos repetindo este acionamento por 4 vezes. As pressões do gás nos reguladores (P1) e (P2) são respectivamente 5 kgf/cm<sup>2</sup> e 2 kgf/cm<sup>2</sup>.

O gás arrastando as partículas do material injetado entra em contato com o gás vindo do forno de pré-aquecimento e entram juntos no forno de combustão onde acontece a queima sendo depois separados o particulado e o gás coletado nas ampolas.

O gás arrastando as partículas do material injetado entra em contato com o gás vindo do forno de pré-aquecimento e entram juntos no forno de combustão onde acontece a queima sendo depois separados o particulado e o gás coletado nas ampolas. As ampolas são de vidro com duas aberturas uma em cada extremidade e um volume interno variando entre 200 e 250 ml, preenchida com água destilada e um corante, à medida que o gás entra na ampola ele expulsa a água por outra extremidade, logo após o gás ser coletado ele é encaminhado ao analisador de gás ORSAT.

### 3.3.1 Orsat

O gás coletado no Simulador de Injeção de Materiais Pulverizados é ligado por uma mangueira de borracha ao ORSAT, após aberta a válvula da ampola o gás é conduzido por mangueira até a válvula de entrada do ORSAT onde pode ser direcionada para cada ampola, como se esta desejar. Escolhida a ampola de solução a ser utilizada, o gás é forçado a passar por esta através de uma diferença de nível entre a solução salina e a ampola que força a separação dos gases, esta diferença é estabelecida até que a solução salina entre em equilíbrio com a solução na ampola de solução do ORSAT não permitindo que mais gás seja absorvido separando assim a fração de gás que a solução esta especificada para separar, após este procedimento se expulsa o gás desta ampola e fecha a válvula que fornece o caminho para esta, repetindo o procedimento para as outras ampolas.

De posse dos resultados do ensaio, calcula-se a taxa de combustão usando-se a expressão mostrada na literatura sobre o assunto <sup>(5)</sup>.

$$TC = \{(\%CO + \%CO_2) \cdot n / [(m_a \cdot \%C_f / 1200000) - (\%CH_4 \cdot n_g / 100)]\} \cdot 100$$

onde:

TC = taxa de combustão (%);

%CO, %CO<sub>2</sub>, %CH<sub>4</sub> = Porcentagens dos gases produzidos;

%C<sub>f</sub> = Carbono fixo contido na amostra;

n<sub>g</sub> = Número de mols do gás depois da experiência;

m<sub>a</sub> = Massa da amostra de carbono injetada em miligramas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterizações Física e Química dos Materiais

O bagaço de cana foi caracterizado no tocante a sua densidade a granel, umidade, análise imediata e PCI. A Tabela 4 mostra os resultados obtidos.

**Tabela 4** – Resultados preliminares de caracterização do pó de bagaço de cana

Parâmetro	Granulometria	Densidade	C	Voláteis	PCI
Unidade	% < 200 #	kg/dm <sup>3</sup>	%	%	kcal/m <sup>3</sup>
Valor	80	195	16,46	78,28	2.095

Foram obtidos ainda resultados de análise elementar do pó oriundo da moagem do bagaço, que foi C = 46,1, H= 6,5 e O = 43,0. Comparando-se estes resultados com resultados mostrados na literatura,<sup>(3)</sup> observa-se uma boa concordância dos mesmos.

Os resultados da caracterização química e granulométrica das amostras estão representados na Tabela 5. Os resultados do ensaio de BET estão representados na Tabela 6. Deve ser salientado que a amostra que compôs a mistura do carvão vegetal com o pó do bagaço de cana foi àquela correspondente a amostra C2.

**Tabela 5** – Representação da análise química e granulométrica do carvão

Amostra	Análise imediata; base seca				Análise elementar				Granulometria média (mm)
	Cf (%)	TU (%)	MV (%)	CZ (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	
C1	54,8	1,4	24,2	21,0					0,070
C2	59,6	1,4	24,6	15,8					0,072
C3	65,3	1,4	24,1	10,6					0,068
U1	59,6	1,1	24,6	15,8					0,070
U2	59,6	2,9	24,6	15,8					0,072
U3	59,6	4,8	24,6	15,8					0,070
G1	60,1	1,5	24,4	15,5					0,070
G2	59,8	1,5	24,3	15,9					0,119
G3	60,9	1,5	24,4	14,7					0,162
AP	60,1	1,6	24,2	15,7	66,67	2,54	0,81	29,98	0,073

### 4.2 Caracterização Metalúrgica

De posse dos resultados obtidos nas queimas das amostras podem-se resumilas na Tabela 7 onde se têm as médias dos valores obtidos nos ensaios e a taxa de combustão. Cada ensaio foi composto da queima de 25 amostras variando a porcentagem da mistura e o peso de cada amostra.

A Figura 7 relaciona a taxa de combustão com a porcentagem de carvão vegetal. No eixo das ordenadas tem-se a taxa de combustão e no eixo das abscissas a porcentagem em peso de carvão vegetal na mistura. A Figura 8 ilustra o efeito da taxa de injeção para duas situações limites, ou seja, 100% de carvão mineral e 100% de bagaço de cana como agente de injeção.

Observa-se que a taxa de combustão de misturas de carvão vegetal passa por um máximo, que normalmente oscila está em torno de 20%. À medida que se aumenta a taxa de injeção, existe uma variação pequena quando se eleva de 50 kg/tgusa para 80 kg/tgusa. Dir-se-ia que a variação da taxa de combustão praticamente é insensível a esta variação. Todavia, quando se eleva a taxa de injeção para 140 kg/tgusa existe um decréscimo sensível na taxa de combustão. Isto pode ser explicado por um mecanismo já proposto por Assis et al.<sup>(2,3)</sup>

**Tabela 6** – Resultados de parâmetros de porosidade e densidade real de carvão vegetal

Amostra	Superfície Específica	Volume total de poros	Volume de microporo* ( $\theta_m < 2\eta m$ )	Área dos microporo*	Diâmetro médio de poros	Tamanho máximo de poros	Densidade
Unidade	m <sup>2</sup> /g	10 <sup>-2</sup> cm <sup>3</sup> /g	x10 <sup>-3</sup> cm <sup>3</sup> /g	m <sup>2</sup> /g	Å	Å	g/cm <sup>3</sup>
<b>C1</b>	1,861	0,5804	0,7991	2,262	120,48	2918,6	1,512
<b>C2</b>	1,729	0,6945	0,7995	2,264	160,07	1342,8	1,504
<b>G1</b>	1,367	0,1143	0,7453	2,110	330,44	1795,4	1,597
<b>G3</b>	2,171	1,086	1,0119	2,885	200,00	1466,8	1,539
<b>AP</b>	2,442	1,102	1,057	2,993	180,05	2278,1	1,555

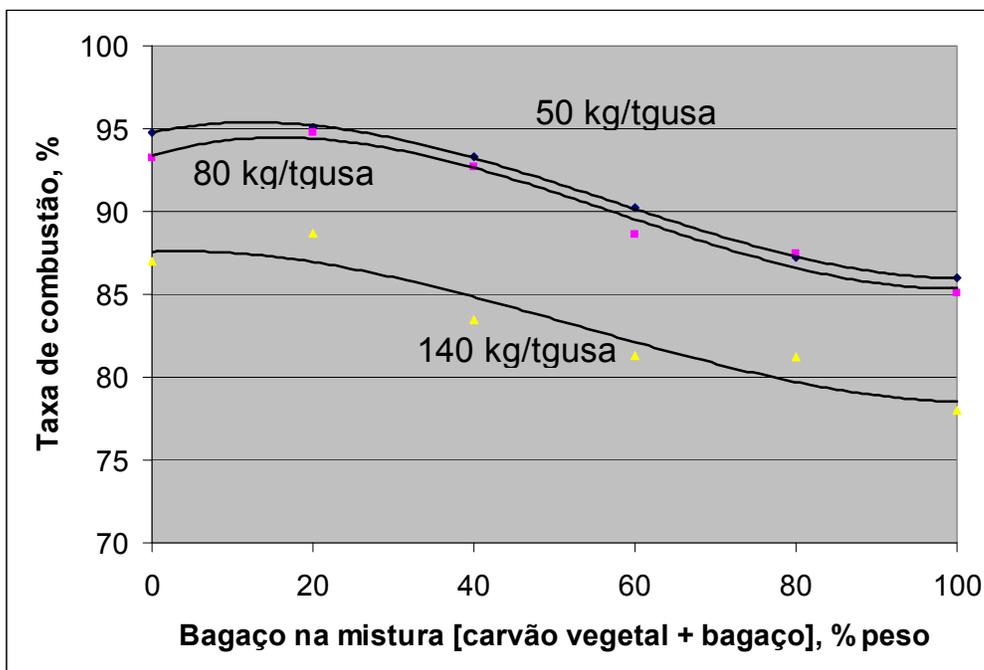
\*Classificação de microporo é por diâmetro ( $\theta_m < 2\eta m$ ) de poro e macróporo ( $\theta_m > 50\eta m$ ) segundo a IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry).

**Tabela 7** – Resultados das taxas de combustão em função do % de carvão vegetal na mistura e da taxa de injeção de misturas (kg/tgusa)

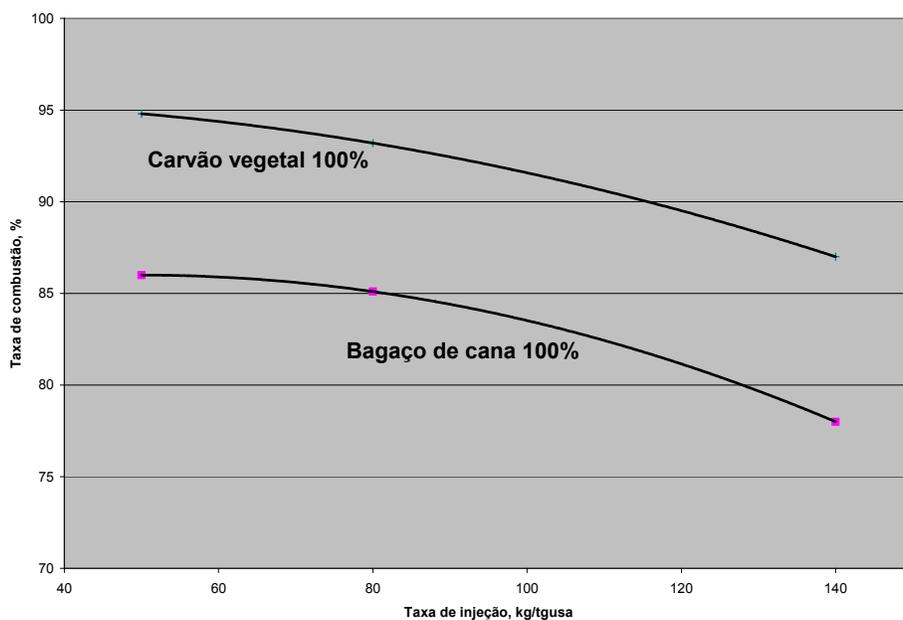
Carvão vegetal + bagaço de cana				
Carvão Vegetal (%)	Bagaço (%)	50 kg/tgusa	80 kg/tgusa	140 kg/tgusa
0	100	86	85,1	78.0
20	80	87,2	87.5	81.3
40	60	90.2	88.6	83.5
60	40	93.3	92.7	88.7
80	20	95.1	94.8	88.7
100	0	94.8	93.2	87

A combinação de fatores ligados a pirólise e a queima dos voláteis explica porque ocorre este aumento da taxa de combustão quando se mistura dois combustíveis.

Quanto ao efeito mostrado na Figura 8, vê-se que à medida que a taxa de injeção aumenta, existe uma menor taxa de combustão. Este efeito é praticamente o mesmo tanto para o carvão vegetal quanto para o bagaço de cana, devido ao elevado teor de voláteis dos dois combustíveis. Isto explica porque existe uma taxa de injeção definida, a partir da qual a taxa de combustão do combustível alternativo (“verde”) se reduz em maior escala. Isto também comprova a possível vantagem técnica de se proceder a misturas de carvão vegetal com bagaço de cana para a injeção em altos-fornos.



**Figura 7:** Efeito do bagaço na mistura de carvão vegetal + bagaço sobre a taxa de combustão.



**Figura 8:** Efeito da taxa de injeção de carvão sobre a taxa de combustão para duas situações limites: 100 % carvão mineral e 100 % de bagaço de cana.

Portanto, sob o ponto de vista de combustão defronte as ventaneiras, é viável a mistura de carvão vegetal com bagaço de cana, sendo que taxas da mistura até 140 kg/t gusa é viável de ser praticada, com até cerca de 30% de bagaço na mesma. Considerou-se um limite de 85% mínimo de combustão para esta prática.

Quando se observam os valores praticados do custo do bagaço de cana, em alguns casos é nulo, visto a não utilização deste material diretamente no campo. fica viável economicamente esta prática que poderia ser feita em altos-fornos, onde houvesse disponibilidade de bagaço nos arredores (em torno de 200 km) de regiões onde existam altos-fornos. Um alto-forno por exemplo de 200 t/dia, injetando uma taxa de 100 kg/t gusa de mistura, considerando esta mistura tecnicamente viável neste reator, consumiria cerca de 6 toneladas diárias de bagaço de cana, representando uma economia estimada de 100000 USD anuais (considera-se um ganho de 47,62 USD/tonelada de bagaço de cana injetado, cerca de 60% do custo do pó de carvão injetado). Se esta avaliação econômica puder ser expandida para uma microrregião do estado de Minas Gerais, com produção anual de 4 milhões de toneladas de gusa, esta prática poderia levar a economias de até 5,7 milhões de dólares de economia, além de vantagens sobre o efeito estufa, podendo gerar créditos adicionais de carbono.

## 5 CONCLUSÕES

Do trabalho realizado, conclui-se:

- existe um aumento na taxa de combustão quando se mistura bagaço de cana com carvão vegetal;
- existe este aumento na Taxa de combustão até 20 % de bagaço na mistura, sendo que para maiores taxas de injeção, existe uma redução da taxa de combustão, mantendo-se o mesmo valor do bagaço percentualmente em relação a mistura;
- aumento da taxa de injeção implica em redução na taxa de combustão para os dois combustíveis. Para aumentos de 50 para 80 kg/tgusa, praticamente não existe alteração da taxa de combustão, todavia quando se eleva para 140 kg/tgusa, existe uma redução sensível na taxa de combustão;
- o aumento da taxa de injeção implica em reduções da taxa de combustão do bagaço similares ao que ocorre com o carvão vegetal, sendo que os valores de redução são similares aos dois combustíveis;
- sob o ponto de vista de combustão defronte as ventaneiras é viável tecnicamente a injeção de misturas de carvão vegetal com bagaço de cana; e
- sob o ponto de vista econômico, pode-se antever ganhos substantivos da injeção de misturas de carvão vegetal com bagaço de cana. Para uma produção de gusa de 4 milhões de toneladas de gusa, estima-se um ganho de 5,7 milhões de dólares americanos anuais.

## Agradecimentos

Os autores agradem a FAPEMIG, CNPq que auxiliar nas pesquisas conduzidas pelo Prof. Paulo Assis. Também são meritórios os apoios da Gusa Nordeste e Gerdau, bem como a UFOP e Fundação Gorceix pelo apoio.

## REFERÊNCIAS

- 1 Disponível em <http://www.agronegocio.goias.gov.br>, acesso Maio de 2008
- 2 Disponível em <http://antoniomelo.pcc.usp.br/arquivos/o%20uso%20de%>, acesso Maio de 2008
- 3 Disponível em <http://www.unica.com.br>, acesso Marco de 2008
- 4 Rezende, E. F.; Reis, E. R.; Dantas, L. H. T.; Silva, V. H.; Assis, P. S. Utilização do bagaço de cana-de-açúcar na geração de energia. Seminário ABM, 2007;37º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, Salvador, ABM, São Paulo-Set. 2007
- 5 Assis, P. S.; Martins, W. B. & Vieira, C. B. Avanços na injeção de carvão pulverizado para a sua aplicação em altos-fornos. REM: Rev. Esc. Minas vol.56 no.4 Ouro Preto Oct./Dec. 2003.