

ESTUDO DO FLUXO DE MATERIAIS PULVERIZADOS EM SIMULADOR DE INJEÇÃO DE VENTANEIRAS DE ALTOS-FORNOS ATRAVÉS DE VÍDEO-FOTOGRAFIA

Geraldo Magela de Oliveira ¹

Vani Aparecida de Oliveira ²

Lindaura de Souza Cândido ³

Paulo Santos Assis ⁴

Resumo

O estudo aqui apresentado, visa o desenvolvimento de uma nova técnica de pesquisa, para os fenômenos que ocorrem no interior das ventaneiras. As técnicas de pesquisas conhecidas, atualmente, na injeção de materiais pulverizados, têm sido realizadas em laboratórios ou no próprio equipamento, no entanto, não apresentam dados de registros visuais auto-explicativos. A escolha do tema deve-se à importância que tem apresentado à necessidade do aumento da taxa de injeção do carvão vegetal ou carvão mineral, com ganhos econômicos para o processo. Considerando que, o custo do redutor é fundamental na matriz de custo de produção de gusa em altos-fornos, todos os esforços para a economia na compra destes produtos têm sido considerados pelas empresas consumidoras. Sabendo-se que, o preço do redutor (seja ele moinha de carvão vegetal, seja ele carvão mineral) é, significativamente, menor do que o redutor granulado enfiado pelo topo e que, a sua substituição ocorre na proporção de 1:1, isto já justificaria as pesquisas. Porém, outros ganhos são computados destacando a injeção de pós em suspensão no alto-forno e todo o descarte dos finos gerados na produção e moagem. Além de economia, estes ganhos propiciam o atendimento às leis ambientais pelas usinas siderúrgicas usuárias do sistema. Considerando que misturas de carvões podem aumentar as taxas de injeção, a presente pesquisa pretende, não só oferecer uma técnica nova de estudo como também conhecer o comportamento de misturas de carvões, na busca de um *blend* que possa aumentar a taxa de injeção, mantendo a mesma taxa de substituição.

Palavras-chave: Ventaneiras; Injeção; Meio ambiente; Fotografia.

VIDEO PHOTOGRAPH USED FOR EVALUATION OF THE FLOW OF PULVERIZED MATERIALS INTO THE BLAST BURNACE TUYERES SIMULATOR

Abstract

This study shows a development of new technique for research the phenomena that occurs in the tuyeres. The known research techniques in the field of injection of materials sprayed in the blast furnaces tuyeres have been carried through in laboratories or in the proper equipment, without however, presenting an auto-clarifying visual registers. The choice of the subject was because of the importance of increased injection rate(charcoal or even coal), with economical benefits to the blast furnace. Considering that the cost of the charcoal or coke is the main raw material in the hot metal cost matrix, then all efforts for the economy in the purchase of these products have been considered for consumers. Just knowing that the price of charcoal fine or coal is significantly less than the coke or charcoal and that its substitution occurs in the ratio of 1:1 justifies the research. There are also other benefits including the injection of powders in suspension in the blast furnace and all the discharging of the fine ones generated in the production and milling. Beyond economy, another benefit is the environmental laws attendance in the steel plants that use the system. Considering that mixtures of coals can increase the injection rate, the present research intends, therefore, not only to offer one new technique of study but also to know the behavior of mixtures of coals, in order to search a "blend" that can increase the powder coal injection rate, with the same substitution rate.

Key words: Tuyeres; Injection; Environment; Photograph.

¹ Membro da ABM, mestrando da REDEMAT. Fotógrafo. Industrial. Professor da Faculdade Pitágoras

² Membro da ABM, Mestre em Geografia pela PUC-MG

³ Membro da ABM, Graduada em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Minas da UFOP

⁴ Membro da ABM. Professor Titular da Escola de Minas, UFOP. Professor da REDEMAT

I INTRODUÇÃO

A injeção de carvão pulverizado e de finos de minérios e fundentes, através das ventaneiras nos altos-fornos, têm sido de grande importância para o setor siderúrgico, na atualidade; e, será fundamental para a sobrevivência do setor num futuro próximo. A redução nos custos de produção (finos tem menor preço no mercado), aumento da produtividade e o atendimento às exigências das leis ambientais, são os fatores que, determinam, não só a instalação dos equipamentos de injeção, como também a melhoria da eficiência das unidades em funcionamento.

Sendo a matéria-prima (carvão ou coque) mais escassa e, conseqüentemente, a de maior custo na produção do gusa, toda e qualquer redução no seu consumo deve ser buscada. Durante a produção e o processamento do carvão vegetal, muita moinha é gerada, podendo chegar até 30% do carvão bruto. Essa moinha e os pós em suspensão no alto-forno podem ser injetados nas ventaneiras, podendo haver substituição do carvão granulado pelo topo em proporções de até 1,25.

Atualmente, mais de 400 altos-fornos no mundo e mais de 30 no Brasil, utilizam o processo de injeção de finos de carvão 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 para o aumento da taxa para além de 200 kg/tgusa. E é nesse ponto onde se situam os maiores esforços para a melhoria de ganhos contínuos no custo de produção nos altos-fornos.

Naturalmente, com o aumento da taxa de injeção de carvão pulverizado, existe uma queda na taxa de substituição de carbono, portanto reduzindo a economicidade do processo. Uma das formas de aumentar a taxa de substituição é através da prática de misturas de carvões a serem injetados. Muitas vezes, não existe um aumento da taxa de substituição com a prática de mistura, exigindo uma pesquisa de misturas e é relevante tentar explicar os fenômenos à luz desta técnica, no local onde ocorre esta injeção.

A presente contribuição técnica pretende pesquisar a relação de mistura de variados tipos de carvões, através da observação vídeo-fotográfica dos fenômenos visuais existentes, após o disparo do jato no Simulador. Visa, também, desenvolver e apresentar mais uma técnica de estudo complementar para o ambiente acima citado utilizando a observação e o registro com o uso da imagem de vídeo e fotografia.

2 OBJETIVOS

- Pesquisar a mistura ideal de dois ou mais tipos de carvões visando o ganho do aumento da taxa de injeção de carvão pulverizado;
- pesquisar as reações de caráter visual existente em alguns pontos do fluxo de materiais injetados; e
- desenvolvimento de técnica específica de análise e registro vídeo-fotográfico em simulador de injeção de materiais pulverizados em ventaneiras de alto-forno.

3 ASPECTOS HISTÓRICOS

3.1 Cronologia

A primeira injeção de carvão em pó na tubulação de vento ocorreu em 1840, quando Corbin d'Arboissières, na França, conseguiu atingir uma economia de 10% de carvão no topo do forno que funcionou de 1840 a 1845, tratando-se de uma unidade que usava uma válvula rotativa alimentada por um funil. Em 1877, Alberts, na Alemanha, patenteou um sistema que era baseado em um leque de rolo. Em 1899, Robison patenteou uma instalação de injeção de carbonos ou pó do coletor no alto-forno, onde o material era transportado até o anel de vento, usando-se um soprador. Em 1916, Basset iniciou a injeção de carvão como um fator de controle de alto-forno. Assim até a década de 1920, existiam indicações de que o alto-forno poderia ser controlado, por alterações da temperatura de sopro, enriquecimento do ar por oxigênio ou pré-aquecidos de combustíveis. No entanto, para os sistemas de injeção, problemas na preparação e secagem de carvões, bem como nos sistemas de controle de injeção por linha (ventaneira) não foram resolvidos. Desta forma, ocorreu uma estabilização na técnica de injeção e só após a segunda guerra mundial é que houve um surto de desenvolvimento da técnica.^(1,2)

Em 1959, pesquisas realizadas com carvão mineral de baixo teor de voláteis e 3% d'água, era moído e peneirado abaixo de 3 mm. Através de transporte por vácuo, o carvão era conduzido para o silo, de onde seguia para dois vasos. Daí o material seguia para as ventaneiras, transportado em meio fluido por diferença de pressão. Várias distribuições granulométricas de carvões foram testadas e os pesquisadores conseguiram injetar 18% do consumo total de combustível, sem elevação da temperatura de sopro. Através da injeção de 135 kg/tgusa, conseguiu-se reduzir de 790 kg/tgusa para 605 kg/tgusa o *coke rate* no alto-forno. Na França, as pesquisas se iniciaram em 1959, através da IRSID (*Institute de Recherche de la Siderurgie Française*) no alto-forno 2, com produção de 160 t/dia, ocorreu uma redução no consumo de coque de 710 kg para 570 kg/tgusa com taxas de 108 kg/tgusa de carvão mineral (taxa de substituição, $\gamma = 1,3$), havendo, inclusive, aumento na produção do alto-forno.⁽²⁾ Igualmente, na Inglaterra foi construída uma instalação que atingiu uma taxa de injeção de 135 kg/tgusa de antracito. O consumo de combustível foi de 925 kg/tgusa devido, entre outros fatores, a qualidade do gusa produzido.

O aspecto econômico foi o principal impulsionador de desenvolvimento nos sistemas de injeção desenvolvidos no mundo. Em 1973, o custo do barril de petróleo quadruplicou, fazendo com que algumas usinas repensassem seus métodos de produção. No Brasil, a Acesita depois de um estudo técnico-econômico das possibilidades de uso da moinha de carvão vegetal, optava pela sua injeção no alto-forno.⁽³⁾ Porém, foi preciso uma nova alta no preço do barril de petróleo, em 1979, para que houvesse uma corrida no desenvolvimento de tecnologias, no mundo inteiro, para substituição do óleo combustível por carvão mineral/carvão vegetal. Paralelo ao fator econômico, que impulsionava o desenvolvimento da tecnologia de injeção de materiais sólidos, havia um melhor conhecimento interno dos alto-fornos.⁽⁴⁾ Em 1978, Arbed, iniciou uma série de experimentos de injeção de lignita. Baseado nesse experimento iniciou-se a implantação de uma instalação nos altos-fornos. A taxa de injeção de carvão, regulada por válvula rotativa, atingiu inicialmente 50 kg/tgusa sendo gradativamente elevada a 90 kg/tgusa, de lignita, obtendo uma taxa de substituição entre 0,54 kg e 0,58 kg coque economizado por kg de lignita injetada.⁽⁵⁾

Em 1981, a Acesita iniciou a injeção de carvão vegetal no alto-forno 2.⁽⁶⁾ Porém, devido a parada daquele alto-forno, o sistema reiniciou a injeção somente em agosto de 1982, sendo então incorporado o processo definitivamente.⁽⁷⁾ No primeiro ano, injetou-se o equivalente a 80 kg/tgusa, com taxas de substituição da ordem de 1,0.^(7,8) Na Alemanha, em 1985, foi instalada a primeira unidade mista de injeção de carvão mineral no mundo. Tratava-se de um trabalho cooperativo da Paul Wurth e Kuttner, onde 15 ventaneiras do alto-forno foram alimentadas por carvões pulverizados através de transporte em meio fluido e as outras 15, em meio denso.⁽⁹⁾

3.2 Fundamentos da Reação de Queima de uma Partícula

O mecanismo de queima de uma partícula de carvão pode ser assim esquematizado:⁽¹⁰⁾

- aquecimento da partícula de carvão;
- pirólise;
- acendimento e queima dos produtos pirolíticos; e
- queima da partícula.

A Figura 1 ilustra o mecanismo de queima de partícula.

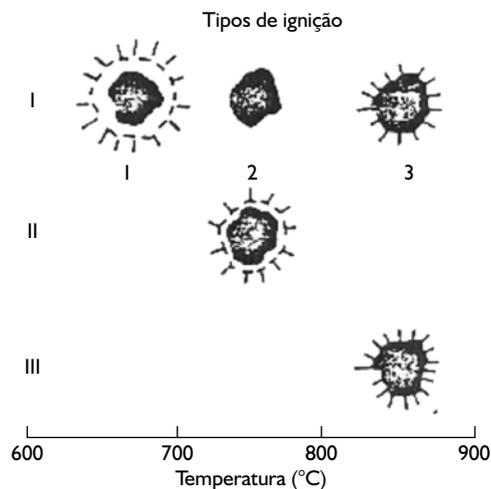
3.3 Pirólise do Carvão

O processo de coqueificação do carvão mineral é um processo pirolítico. Este processo se inicia a 50°C e termina em torno de 100°C com a evaporação da umidade do carvão. A partir de 100°C são liberados os gases CO, C_nH_m e N, além da água de cristalização contida no carvão, terminando na faixa de 360°C a 430°C.

A partir de 360°C se dá o início de amolecimento e a formação de um material isotrópico.

3.3.1 Dilatação do carvão

A fluidez do carvão é um fator que afeta a estrutura do coque. A dilatação do carvão é uma das variáveis que influencia esta fluidez. Para o carvão betuminoso, existe uma dilatação muito



- I 1 Ignição e queima dos materiais voláteis
2 Aumento da temperatura
3 Ignição da partícula
- II Ignição dos materiais voláteis e da partícula simultaneamente
- III Ignição da partícula

Figura 1. Mecanismo de queima de carvão mineral.⁽¹¹⁾

elevada, criando uma elevada pressão interna. Uma redução na dilatação do material, como no carvão médio-volátil, pode levar a uma desintegração do mesmo quando houver liberação dos gases.⁽¹³⁾ Outro fator também influente no processo é o teor de voláteis do carvão mineral. O elevado índice de dilatação do carvão (K27) induz a redução da resistência da estrutura do semi-coque.

Constatou-se que o teor de voláteis do carvão mineral e o tamanho da partícula exercem uma grande influência na dilatação e no encolhimento da partícula. As pesquisas feitas com diferentes tipos de carvão mostram que, na pirólise, à medida que o teor de voláteis aumenta, existe uma redução no tamanho das partículas.⁽¹⁴⁾

3.4 Medidas em Altos-fornos

Já foram desenvolvidas sondas para penetração na zona de combustão do alto-forno, tanto a coque quanto a carvão vegetal, para verificar o comportamento do *raceway* quando se injeta pó de carvão.

Amostras de carvão no nível das ventaneiras dos altos-fornos chineses mostraram um índice de combustão de 705 a 80% para antracito. O que leva a crer que para o carvão mineral com maior teor em voláteis, maior índice de combustão é possível.

A taxa máxima obtida com antracito foi de 150 kg/tgusa, enquanto que quando o ar enriquecido com oxigênio, atingiu-se cerca de 279 kg/tgusa. No entanto, o consumo de coque foi superior a 600 kg/tgusa.⁽¹⁵⁾

Igualmente foi pesquisada na zona de combustão do alto-forno da Vallourec Mannesmann, diâmetro do cadinho de 5,5 m, utilizando carvão vegetal como redutor e injeção de dois tipos de carvão vegetal. Observou-se que o aumento do tamanho médio de 0,050 mm para 0,180 mm não afeta a combustão do carvão vegetal a tal ponto de comprometer o sucesso da injeção.⁽¹⁶⁾

3.5 Prática de Injeção de Materiais Pulverizados

Antes de comentar sobre a prática de injeção de materiais pulverizados, mostra-se na Figura 2 uma representação de ICP no alto-forno.

Deve ser salientado que injeções de carvão mineral, carvão vegetal, misturas de carvões,^(18,19) pré-aquecimento de carvões, injeção de plásticos, injeção de pneus, injeção de minério e outros tem sido noticiados largamente na literatura.

Um das maneiras de elevar a taxa de combustão é a mistura entre carvões minerais. A relação molar [O/C], isto é a quantidade de oxigênio relativa a quantidade de carbono injetada é importante para alterar o índice de combustão. Normalmente, maior valor de [O/C] induz a maior taxa de combustão.^(20,21)

3.6 Aspectos Econômicos da Injeção

O objetivo precípua da injeção de carvão pulverizado em altos-fornos é o de economizar coque ou carvão vegetal granulado, carregados pelo topo. A economia de coque leva a possibilidade de aumento da produção de gusa, para o mesmo nível de produção da coqueria, ou uma economia no investimento na coqueria, para o mesmo nível de produção do gusa. No caso do carvão vegetal, economias são obtidas no reflorestamento, para uma determinada produção de gusa.

Um aspecto fundamental, também relativo ao efeito da injeção de carvão pulverizado em altos-fornos, é a melhoria ambiental, devido ao aproveitamento integral do pó do desempoiamento e a redução do efeito estufa.

Outros fatores de importância na economicidade do processo de injeção são: aumento da vida útil das coquerias, utilização de carvões de baixo custo e não coqueificáveis, aproveitamento mais racional de jazidas de carvão mineral, menor risco de incêndio para produtores de gusa a carvão vegetal.

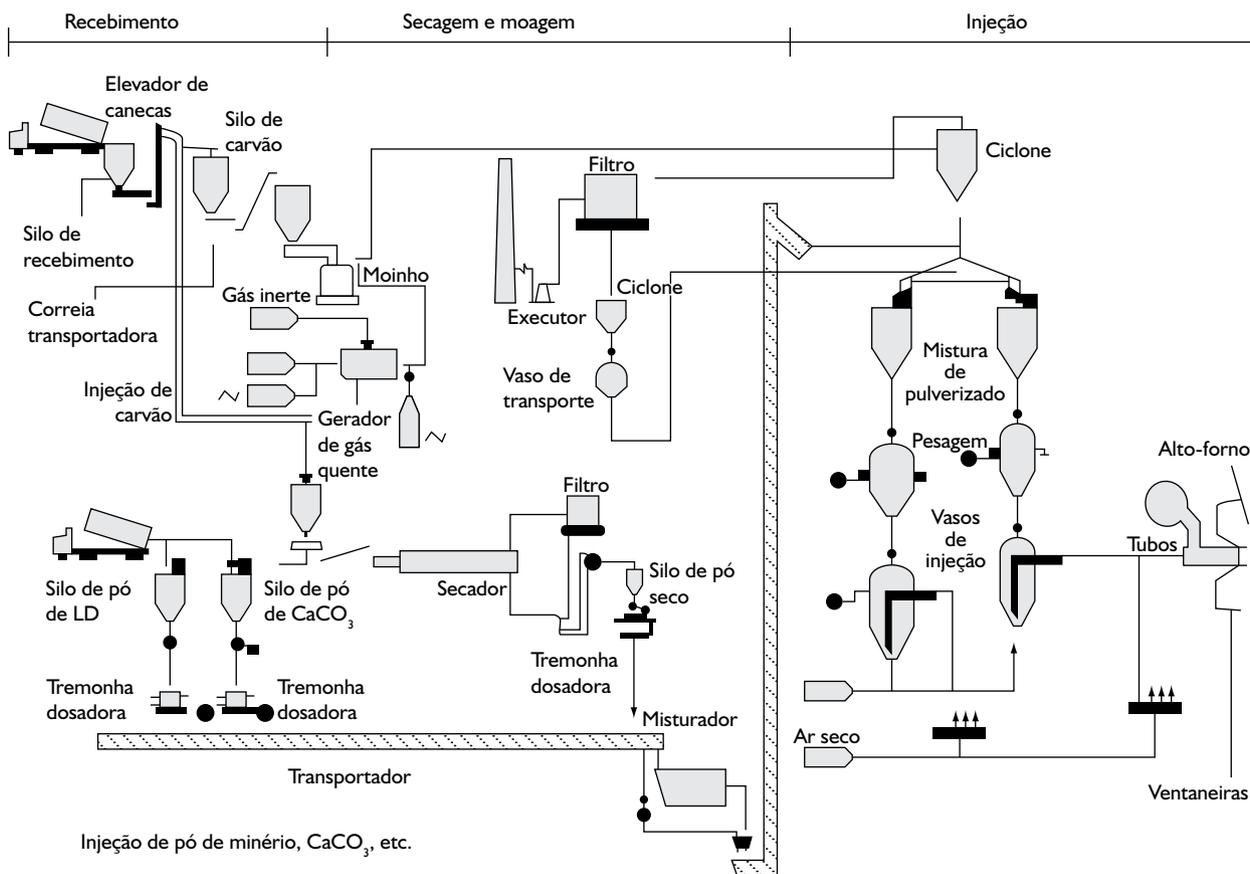


Figura 2. Esquema de injeção de partículas sólidas no alto-forno.⁽¹⁷⁾

4 A PESQUISA

Esta pesquisa pretende (E) estudar o fluxo de particulados de carvão vegetal ou mineral e suas misturas em ventaneiras de altos-fornos, sendo a motivação da criação desta nova técnica de investigação científica. A Figura 3 ilustra o ambiente industrial a que se refere a pesquisa. Nela se observa o corpo da ventaneira que é alimentada por sopro de ar quente (eventualmente enriquecido com oxigênio) e carvão pulverizado injetado em uma lança situada na parte lateral do algaraviz.

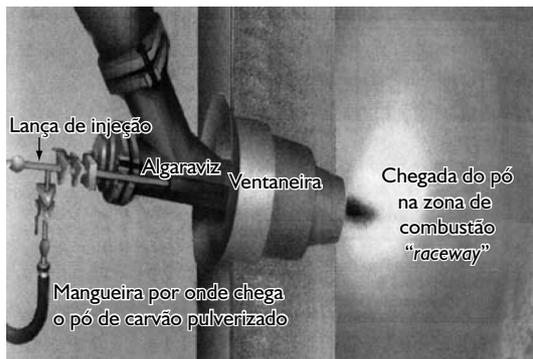


Figura 3. Ilustração do ambiente estudado no alto-forno

Esta pesquisa vem sendo executada no equipamento “simulador de injeção de materiais pulverizados nas ventaneiras de alto-forno”, existente no laboratório de siderurgia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Foram adotados alguns materiais com características de fluidez aproximadas dos particulados estudados e de cores bem distintas e contrastantes dos mesmos, para servirem como elementos de comparação.

A Figura 4, ilustra uma foto do equipamento usado. Este equipamento foi construído usando métodos similares usados tanto na China, quanto na Alemanha.^(15,16,20,21) Neste simulador, pode-se ver do lado esquerdo, ao fundo a região de baixa pressão, que simula o sistema de injeção antes do pó adentrar nas ventaneiras.

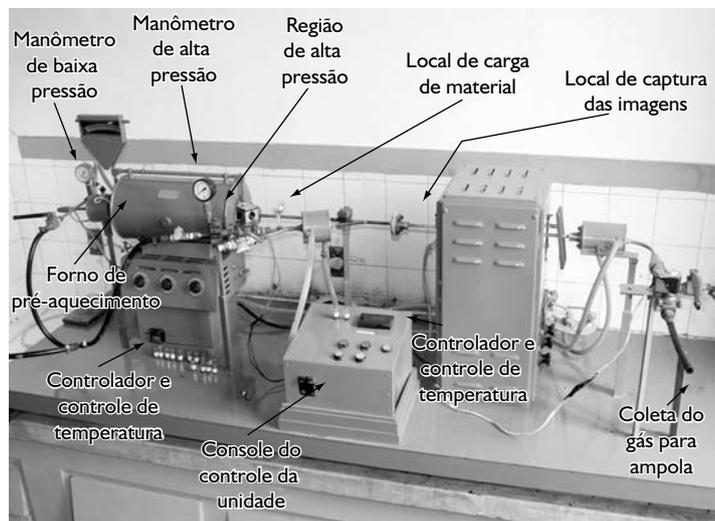


Figura 4. Foto ilustrativa do equipamento usado para ensaios de combustão (Laboratório de Siderurgia da Escola de Minas – UFOP)

Na parte frontal, ao lado do sistema de controle da unidade (uma caixa cinza com as botoeiras), observa-se a região com elevada pressão, onde se situa um manômetro para medição da pressão reinante. Esta região é fundamental, pois após a abertura das válvulas solenóides, cria-se uma onda de choque que vai garantir uma velocidade elevada no pó de carvão (que é alimentado em bocal situado a 10 cm a jusante da primeira válvula solenóide). Na região situada a direita da foto, tem-se o forno por onde o pó de carvão vai escoar e haverá a sua combustão. Após a combustão, o gás é recolhido em uma ampola que é encaixada na mangueira vista a direita da unidade. Este gás é analisado, normalmente através de um equipamento chamado ORSAT. Após a análise do gás e o uso de um modelo matemático especialmente desenvolvido pelos pesquisadores, pode-se então calcular o índice de combustão do carvão pulverizado. Todas as regiões que estão submetidas a altas temperaturas são refrigeradas para evitar acidentes durante a operação da unidade. Na figura são indicados os principais pontos a que se referiram as explicações supra-citadas.

No Simulador de Injeção de Materiais Pulverizados já foram desenvolvidos vários testes com variados tipos de carvões em diversas ocasiões, para diversas empresas, sendo os seus resultados sempre corroborados quando aplicados industrialmente. No entanto, faltam registros fotográficos dos ensaios de tal sorte a confirmar ou não o mecanismo proposto de combustão de partículas quando dois ou mais tipos de carvões são misturados. Além disto, algumas misturas praticadas tiveram os seus resultados diversos daqueles obtidos em caráter industrial. Certamente a questão da mistura dos carvões para melhorar o desempenho de sistemas de injeção de carvão pulverizado é uma dúvida que ainda reina no mundo siderúrgico, ou seja, desenvolver mecanismos que possam explicar a maior ou menor combustão de carvões misturados na zona de combustão.

Assim, o presente trabalho mostra alguns detalhes dos fundamentos do uso da vídeo-fotografia para estudo do comportamento dinâmico de partículas no equipamento em tela.

5 METODOLOGIA

5.1 Processo de Carregamento

As amostras são pesadas e misturadas em diferentes proporções e colocadas no recipiente

de carregamento. A dosagem da quantidade vai depender da taxa de injeção de carvão, do nível de enriquecimento do ar em oxigênio, da engenharia da unidade laboratorial, da quantidade específica de ar soprado. De posse destes dados, através de modelo matemático, determina-se a quantidade de pó a ser carregada na unidade. A Figura 5, mostra um detalhe da carga da unidade laboratorial, usando um funil de vidro e o material previamente pesado.

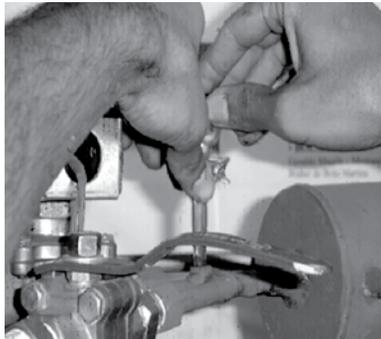


Figura 5. Detalhe do local de carregamento do material a ser ensaiado

Deve ser salientado que a carga do material é feita, após todos os fornos estarem nas temperaturas objetivadas de trabalho. Após o pré-aquecimento dos fornos, faz-se a carga do material, neste momento, pressurizam-se as duas regiões em alta pressão (em torno de 5 bar a 6 bar) e baixa pressão (1,5 bar a 2 bar).

Neste momento, aciona-se a botoeira do controle central, abrindo-se automaticamente as duas válvulas solenóides, permitindo então o disparo de gás – de pressão controlada – promovendo o escoamento do material com elevada velocidade. O material passa por uma tubulação de aço inicial, adentrando na tubulação de quartzo. O detalhe é mostrado na Figura 6, onde se vê na parte central o resfriador instalado em uma região estratégica para evitar acidentes e dilatações indesejadas do sistema.

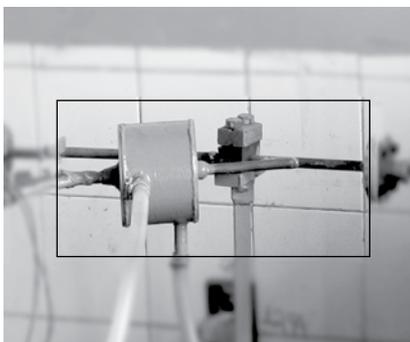


Figura 6. Detalhe do tubo de aço e a conexão com o tubo de vidro óptico.

A seguir, o fluxo atinge o tubo de vidro de alta qualidade ótica onde são tomadas as imagens de vídeo e fotografia. Deve ser observado na Figura 7, o sistema de controle de temperatura, através da inserção de termoelementos de Pt-PtRh e do sistema de aquecimento que é feito com tubos de carbeto de silício, garantindo um aquecimento homogêneo.

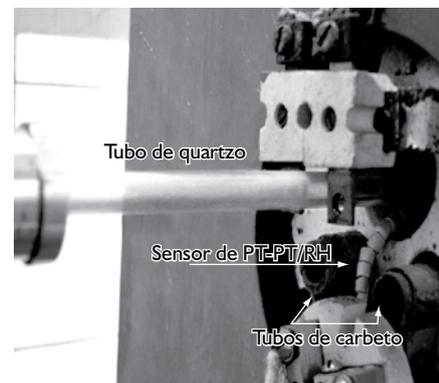


Figura 7. Detalhe de parte da conexão e o tubo de vidro ótico.

5.2 Equipamentos Utilizados

Toda a pesquisa é feita usando processo fotográfico e videográfico. As vantagens oferecidas pela fotografia consiste em oferecer maior resolução de imagem para ampliações. A videografia oferece a possibilidade de verificação passo-a-passo (*frame to frame*), limitado a 30 quadros por segundo - número condicionado pelo modelo de câmera utilizado - além da análise de tempo durante o fluxo.

5.2.1 Fotográficos

A Figura 8 mostra uma câmera digital de alta resolução (8 MPixels) usada na pesquisa.



Figura 8. Câmera digital de alta resolução utilizada na pesquisa

A definição da qualidade da imagem em fotografias digitais depende, entre outros fatores, da quantidade de Mp (megapixels), sendo o pixel (*picture elements*) a unidade básica da imagem na câmera digital. O equivalente ao filme no sistema analógico é o sensor, onde se encontram alojados os pixels.

5.2.2 Videografia

Apesar de ser um equipamento pequeno, a câmera utilizada oferece grande resolução e facilidade de captação de imagens macro através de sua objetiva original e com anéis de adaptação para lentes close-up.

O seu curto tempo de obturação oferece boa possibilidade de análise de imagens em *slow-motion*. Assim, o estudo da dinâmica do fluxo fica facilitado. A Figura 9 ilustra a filmadora digital usada para as pesquisas.



Figura 9. Filmadora digital com macro.

6 MATERIAL DE ANÁLISE, IMAGENS E ANÁLISE COMPARATIVA

As seguintes condições e materiais têm sido consideradas na pesquisa:

- Tipo de material analisado: pó de carvão vegetal e pó de carvão mineral;
- Material comparativo no fluxo e no contraste: materiais orgânicos para fornecer contraste de cores. ;
- Parâmetros como distribuição granulométrica, densidade e ângulo de repouso são analisados antes dos ensaios; e
- Dosagem: percentuais de 20% tanto do analisado quanto do comparativo., (O) ou seja, variações de 0% a 100% do material base (por exemplo carvão) + outro material para contraste.

6.1 Captura das Imagens

Basicamente são feitas usando os dois equipamentos retro-mencionados:

- Captação da imagem em vídeo: garantida a captação, porém com possibilidade de ampliação muito limitada. No entanto, tem-se uma imagem do fluxo contínuo das partículas; e
- Captação fotográfica: ideal para ampliação, porém têm-se ainda dificuldades de sincronização do momento foto/fluxo enquadrado. Possivelmente, acoplado ao controle de abertura das válvulas solenóides, será feito o acionamento do disparo da máquina fotográfica, garantindo o tempo de exposição correto para avaliação dos resultados.

6.2 Técnica Comparativa

Os resultados devem ser analisados, considerando:

- Verificando as cores presentes numa mesma área no tubo, espera-se quantificar a presença do percentual do material analisado e do material comparativo, através de cores RGB no programa Photoshop CSIII.
- Através da verificação de fotografias nos percentuais de mistura idênticos aos colocados para ensaio. Comparação visual das fotos tomadas após ensaio com as utilizadas como parâmetro.

7 RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÃO

Foram realizados alguns ensaios para verificação da expectativa de que materiais com menor ângulo de repouso teriam deslocamento mais rápido do que os demais. Ensaios a temperatura ambiente indicam que não existem alterações significativas em termos de fluxo de materiais, quando cotejados com elevadas temperaturas (acima de 1.000°C).

Diante dos resultados preliminares, ficou patente a necessidade de se criar parâmetros visuais de análise para posteriormente serem submetidas às imagens colhidas no decorrer do processo.

Um controle rígido de iluminação e temperatura de cor está sendo observado e os resultados estão sendo catalogados num formulário especialmente criado para a sistematização e tabulação.

Inicialmente testes estão sendo feitos visando a criação de uma rotina de trabalho onde o equacionamento do tempo de exposição, nitidez e simultaneidade da passagem do fluxo estará resolvida. Variadas situações estão sendo estudadas tanto em baixa como em alta temperatura e com variações de pressão dos sistemas que compõem o equipamento.

Uma batelada de ensaios variando a densidade dos materiais, ângulos de repouso e percentual de mistura deverá ser feita nos próximos meses. Assim, espera-se que os primeiros resultados práticos estarão disponíveis proximamente.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do presente trabalho de pesquisa, fica consubstanciado que:

- Existe economia emergente devido à injeção de carvão vegetal e carvão mineral em altos-fornos brasileiros de cerca de mais de 100 milhões de dólares anuais;
- os fatores técnicos ligados ao processo de injeção ao alto-forno e ao equipamento permitem antever taxas superiores a 200 kg/t gusa, com ganhos imediatos;
- a elevação da granulometria do carvão vegetal a ser injetado é uma técnica que pode viabilizar mais ainda o processo de injeção de moinha; enquanto que o mesmo para o carvão mineral tem que ser analisado à luz de ensaios de combustão;
- a técnica de injeção de finos em ventaneiras deverá possibilitar um melhor aproveitamento não só da moinha de carvão vegetal, de carvões minerais não coqueificáveis, bem como de resíduos industriais como: pó do coletor, lamas, *pellet feet* e carepas;
- as misturas de carvões minerais e/ou vegetais podem ser uma técnica eficiente na obtenção de maiores taxas de injeção;
- o uso de foto e vídeo para a produção de imagens na captação do movimento de partículas no simulador pode ser um instrumento poderoso para avaliar os mecanismos de combustão de diferentes misturas de materiais;

- uma maneira inovadora de poder pesquisar o fluxo dos materiais pulverizados através de imagens poderá facilitar a identificação de diferenças comportamentais mediante a regulagem de pressão e o fluxo dos finos, além de outros tipos de investigação científica; e
- esta técnica permitirá ver o fluxo de diferentes partículas e o seu estudo de oxidação poderá ser mais facilmente compreendido, quando cotejados com a prática industrial.

Assim sendo, a possibilidade de poder pesquisar o fluxo dos materiais pulverizados através de imagens poderá facilitar a identificação de diferenças comportamentais mediante a regulagem de pressão e o fluxo do material pesquisado, além de outros tipos de investigação científica. Portanto, para os sistemas de injeção de materiais sólidos nas ventaneiras do alto-forno existe uma gama de novas técnicas que permitem a obtenção de bons resultados metalúrgicos.

Agradecimentos

Os agradecimentos são extensivos a White Martins, Minitec, Escola de Minas-UFOP, a REDEMAT, ao CNPq e a FAPEMIG. A Lílian Bambirra de Assis pela correção do Abstract

REFERÊNCIAS

- 1 BERTAM, E. Das Einblasen von Schmelz- und Brennstoffen in die Gestellzone der Eisenhochoefen. **Archiv Eisenhüttenwesen**, v. 1, n. 1, p. 19-32, 1927.
- 2 UHL, U. Verfahren zum Einstaz von Kohle in Hochofenprozess. **Erdoel und Kohle** v. 18, n. 2, p. 87-92, 1965.
- 3 SILVEIRA, R.C.; CAMPOS, V.F. Uso de finos de carvão vegetal. **Metalurgia e Materiais**, v. 33, n. 273, p. 497-501, ago. 1977.
- 4 GUDENAU, H. W.; SASABE, M.; KREIBICH, K. Untersuchungen an abgehuehten Hochoefen in Japan. **Stahl und Eisen**, v. 97, n. 6, p. 291-5, 1977.
- 5 LIMPACH, R.; KOSTER, J.; BOECKER, D.; DREUSING, H. Versuch zum Einblasen von Braunkohlenstaub in den Hochofen. **Stahl und Eisen**, v. 103, n.13, p. 649-53, 1983..
- 6 ASSIS, P.S.; SANTIAGO, R.; BRAGA, R. N. B.; MARINHO, L. Z. A.; MIWA, E. K. Análise do modelo de fabricação de gusa a carvão vegetal da Acesita. In: CONGRESSO ILAFA: ALTO-FORNO, 1982, Rio de Janeiro. Santiago do Chile: ILAFA, 1982. p. E1 – E7.
- 7 ASSIS, P. S.; BRAGA, R. N. B.; PORTO, F. M. Injeção de carvão vegetal pulverizado em altos-fornos. In: SEMINÁRIO SOBRE ALTERNATIVAS A IMPORTAÇÃO DE CARVÃO METALÚRGICO PARA A SIDERURGIA BRASILEIRA, 1983, Volta Redonda. São Paulo: ABM, 1993. p.15-29.
- 8 BRAGA, R. N. B.; SILVA NETO, J. B.; ANDRADE, J. O. Operação de altos-fornos a carvão vegetal de grande porte com injeção de carvão pulverizado. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA SIDERÚRGICA, 1., 1986, São Paulo. São Paulo: ABM, 1986. p. 653-64.
- 9 ASSIS, P. S. Relatório interno de estágio na Thyssen Stahl AG. 1985. [Reservado].
- 10 DICKE, U. **Untersuchung der Kohlevergasung im Wirbelbett**. 1985. 139p. (Dissertation) – Rheinisch-Westfaelischen Technischen Hochschule, Aachen, 1985.
- 11 KOCH, V. **Entgasung von Steinkohlen bei hohen Aufheizgeschwindigkeiten und ihre Bedeutung fuer den Verbrennungsablauf**. 1968. 142p. (Dissertation) – Rheinisch-Westfaelischen Technischen Hochschule Aachen, 1968.

- 12 MARSH, H. Informationstagung Kokereitechnik Luxemburg 1981, Verlag Glueckauf GmbH 1982, S. 81-103.
- 13 HAGEMANN, H. W. Materialsammlung zunn Praktikum "Angewandte Kohlenpetrographie" Lehrstuhl fuer Geologie, Geochemie und Lagerstaetten des Erdoels und der Kohle der RWTH Aachen, 1985. [notas de aula]
- 14 HERMANN, W. Título do artigo. **Glueckauf**, v. 109, n.14, p. 714-21, 1973.
- 15 YUN-ZUI, G.; YUN-CAI, L. Injection de poudre dans le Haut.-Fourneau. **Revue de Metalurgie** – CIT, v. 77, n.10, p. 841-51, 1980.
- 16 ASSIS, P. S. **Einblasen von Hohle in den Holzkohlehoefen**. 1991., 125 p. (Dissertation) – Rheinisch-Westfaelischen Technischen Hochschule Aachen, 1991.
- 17 SEXTON, J. R.; WERNNERSTROM, J.M. Blast furnace coal injection long proven now economical. **Iron and Steel Engineer**, n.1, p. 38-41, 1983.
- 18 BRAGA, R. N. B; BRAZ NETO, J. S.; GONÇALVES, H. T. Aspectos tecnológicos referentes a injeção de matérias pulverizados em alto-fornos In: CURSO SOBRE INJEÇÃO DE MATÉRIAS PULVERIZADOS EM ALTOS-FORNOS, 1993, São Paulo. São Paulo: ABM, 1993. p.1-34.
- 19 WEBER, S. H. J. V. **Caracterização de misturas de finos de carvão vegetal e mineral para injeção nas ventaneiras do alto-forno**. 1990. 92 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1990.
- 20 KORTHAS, B. **Untersuchungen der Verbrennungsvorgaenge Hoher Kohlenstaubmengen unter Hochofennahen Bedingugen und ihre Auswirkung auf die Hochfenstromung**. 1987. 136p. (Dissertation) Rheinisch-Westfaelischen Technischen Hochschule, Aachen, 1987.
- 21 BIRKAEUSER, L. Kohlenstaubleinblasen in den Hochofen: Die Verbrennungseigenschaften verschiedener Kohlen und ihre Auswirkungen auf den hochofen. 1990. 118 p. (Dissertation) Rheinisch-Westfaelischen Technischen Hochschule, Aachen, 1990.

Recebido em: 22/01/07

Aceito em: 22/06/07

Proveniente de: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 36., 2006, Ouro Preto. São Paulo: ABM, 2006.