

ESTIMATIVA DO PERFIL TÉRMICO DE LANÇAS PARA PCI E DO ESCOAMENTO DE FLUIDO EM SEU INTERIOR ¹

Magno A. Calil Resende Silveira ²

Ivênio de Oliveira Teixeira ³

Ricardo Machado Cabral ⁴

Marco Aurélio Garcia de Oliveira ⁵

Resumo

Devido ao aumento da pressão no vaso de injeção de finos do Alto-Forno 3 da planta de Ipatinga da Usiminas, a equipe técnica da área de redução aumentou o diâmetro interno das lanças de PCI, sem modificar o externo, com a finalidade de manter a taxa de injeção de carvão pulverizado acima de 140 kg/tonelada gusa. Para se avaliar o efeito dessa modificação, foi construído um modelo termo-fluidodinâmico utilizando o *software* ANSYS CFX® que permite analisar o escoamento de gases e sólidos através da ventaneira e da lança de injeção de finos do alto-forno, e a estrutura da lança exposta no algaraviz e ventaneira. Paralelamente, foi construído um dispositivo para fazer a aquisição das temperaturas da parede da lança e do fluido de refrigeração para a validação térmica do modelo. Os resultados mostraram que, em condições normais de operação, o material utilizado para fabricação das lanças é capaz de resistir à temperatura máxima alcançada. Foi possível também identificar o comportamento das lanças em situações de anormalidades operacionais.

Palavras-chave: Modelagem; Simulação fluidodinâmica; Injeção de finos de carvão; Alto-forno.

ESTIMATION OF THERMAL PROFILE ON PCI LANCES AND OF FLUID INTERNAL FLOW

Abstract

Because of the increased pressure in the Blast Furnace 3 fines injection vase, at Usiminas (Ipatinga plant), the ironmaking team decided to increase the PCI lances' internal diameter, without modifying the external, in order to maintain PCI rate around 140 kg/ton hot metal. To evaluate the effect of this change, a thermo-fluid-dynamics model was built using the ANSYS CFX® software to analyze the gases and solids flow through the tuyere and the PCI lance behaviour in a blast furnace, and the lance exposed structure in tuyere. A device was built to measure the wall temperatures and the cooling fluid to validate the thermal model. The results showed that in normal operation, the material used for the manufacture of lances is capable of resisting the maximum temperature reached. Also, it's possible to identify the lance behaviour in "unusual" operational cases.

Key words: Modelling; Thermo-fluid-dynamics simulation; PCI; Blast furnace.

¹ Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.

² Membro da ABM, Engenheiro Químico, M.Sc., Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

³ Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, M.Sc., CQE/ASQ, Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

⁴ Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, M.Sc., MBA, Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG.

⁵ Membro da ABM, Engenheiro Metalúrgico, MBA, Superintendência de Redução da Usiminas; Ipatinga, MG.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o processo de produção de gusa em altos-fornos tem tido grandes avanços, tanto na parte de controle quanto na utilização de novos equipamentos, o que tem gerado resultados expressivos de redução dos custos de produção de gusa e em termos de flexibilidade operacional. Neste contexto, uma das alternativas mais utilizadas, por grande parte das empresas, é a injeção de carvão pulverizado através das ventaneiras do alto-forno.⁽¹⁾

Na Usiminas essa prática se iniciou a partir de 1993⁽²⁾ e, devido principalmente ao gradual aumento de produtividade dos altos-fornos nos últimos anos, esse sistema vem operando próximo aos limites máximos operacionais e de produção, podendo trazer eventuais anormalidades para a injeção e, conseqüentemente para os altos-fornos, sobretudo para o Alto-Forno 3 da usina de Ipatinga da Usiminas, que demanda maior quantidade horária de carvão pulverizado. Na tentativa de melhorar o desempenho da injeção de PCI nos altos-fornos, foram feitas pequenas modificações, considerando-se avaliação industrial parcial, em que nem todos os efeitos sobre a operacionalidade e/ou estabilidade do reator foram avaliados. A modificação mais recente no sistema de injeção foi o aumento do diâmetro interno das lanças de injeção do Alto-Forno 3, visando, principalmente, reduzir a pressão no vaso de injeção de carvão pulverizado, possibilitando uma melhora no transporte do carvão e diminuição das ocorrências de obstruções seguidas de furos e fraturas nas lanças. Entretanto, como o diâmetro externo permaneceu o mesmo, a espessura da parede reduziu-se, ficando a lança mais susceptível a problemas devido à alta temperatura na parte exposta nos algaravizes e ventaneiras.

Por esse motivo, foi feita uma modelagem termo-fluidodinâmica dos gases e sólidos que escoam através da geometria formada pela ventaneira, lança e *raceway*, que permite simular diversas situações de operação. Com o modelo foi possível analisar o real efeito de algumas modificações efetuadas, principalmente em relação à última, relatada anteriormente. Nas simulações aqui apresentadas foram utilizadas diferentes condições operacionais, com o objetivo de mostrar possíveis danos e suas conseqüências para as lanças de injeção, sobretudo furos, rasgos e fraturas, e para o forno, o que pode ajudar na busca de contra-medidas para preservar tais equipamentos.

2 CONSIDERAÇÕES GERAIS

2.1 Sistema de Transporte do Carvão Pulverizado

O transporte de carvão para injeção é fundamentado em escoamento bifásico particulado, que apresenta fenômenos complexos em relação ao tratamento físico e matemático.⁽³⁾ Ao longo de toda a planta de injeção podem ser encontrados escoamentos verticais e horizontais do sistema bifásico, sendo de interesse neste trabalho somente estes últimos.

Considerando-se todo o sistema de injeção de finos, o princípio de transporte do carvão está associado às forças de pressão, peso, atrito e arraste, sendo esta última a principal força propulsora para transportar sólidos horizontalmente. Em fases diluídas, que apresentam elevada velocidade e baixa concentração volumétrica, a força de atrito é relevante, provocando desgaste nas tubulações. Já em fases

densas essa força apresenta valores menores, promovendo pouco desgaste nas tubulações.

O carvão do sistema de injeção de finos instalado na planta de Ipatinga da Usiminas é transportado em fase densa fluidizada até o acelerador da lança de injeção. Após este dispositivo, o transporte dentro da lança se dá em fase diluída, podendo causar desgaste da sua parede interna. Dependendo das condições de escoamento no interior da lança, como por exemplo maior volume de nitrogênio, a erosão pode ser mais acentuada. Já a insuficiência de nitrogênio pode causar entupimentos parciais e incrustações, reduzindo a área de escoamento e desviando o fluxo de material, levando a uma erosão localizada. É importante ressaltar que a colisão de partículas com a parede interna da lança proporciona, no mínimo, uma perda de carga no sistema e uma dificuldade extra no escoamento, devido à desaceleração e posterior gasto de energia para nova aceleração das partículas.

2.2 Escoamento e Modelagem Multifásico

Sistema multifásico é definido como uma região do espaço onde coexistem dois ou mais fluidos imiscíveis separados por uma interface, podendo esta ser conexa ou desconexa ou uma combinação de ambos os casos onde a mesma fase pode aparecer em forma contínua ou dispersa.⁽⁴⁾ Um sistema bifásico, de fluxo disperso particulado, é aquele em que a mistura entre as fases ocorre em nível macroscópico, sendo que cada fase pode ser modelada com sua própria velocidade, juntamente com a transferência de quantidade de movimento interfacial.

A equação geral que descreve um sistema bifásico,⁽⁵⁾ deduzido a partir de um balanço integral, considerando-se um volume de controle, é dado pela equação 1. Depois de algumas considerações e manipulações algébricas a equação 1 pode ser escrita conforme equação 2.

$$\sum_{k=1}^2 \left(\frac{d}{dt} \int_{V_k(t)} \rho_k \psi_k dV \right) = \int_{A_i(t)} \phi_i dA + \sum_{k=1}^2 \left[- \int_{A_k(t)} \rho_k \psi_k (u_k \cdot n_k) dA + \int_{V_k(t)} \rho_k \phi_k dV - \int_{A_k(t)} J_k \cdot n_k dA \right] \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^2 \int_{V_k(t)} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_k \psi_k) + \nabla \cdot (\rho_k \psi_k u_k) + \nabla \cdot J_k - \rho_k \phi_k \right] dV - \int_{A_i(t)} \left[\sum_{k=1}^2 (m_k \psi_k + J_k \cdot n_k) + \phi_i \right] dA = 0 \quad (2)$$

em que a primeira integral (volumétrica) representa os volumes ocupados pelas duas fases e a segunda (de superfície) expressa as condições de salto através da interface. A equação 2 pode ser aplicada para o transporte de massa, momento, energia etc., substituindo-se os termos da equação conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de ψ_k , J_k , ϕ_k , ϕ_i , para a equação 2⁽⁵⁾

Balanço	ψ_k	J_k	ϕ_k	ϕ_i
Massa	1	0	0	0
Momento	U_k	$-T_k$	B	0
Energia	E_k	$q_k - T_k \cdot U_k$	$b \cdot U_k$	0
Entropia	s_k	q_k / θ_k	Δ_k / ρ_k	Δ_i

2.3 Considerações do Modelo

Nas simulações do escoamento analisado neste trabalho utilizaram-se as abordagens multifásicas lagrangeana e euleriana. Para a primeira, o intuito foi o de

identificar a trajetória das partículas de carvão e os aspectos qualitativos da erosão, fenômeno que ocorre no interior das lanças de injeção. Para a segunda abordagem objetivou-se evidenciar os gradientes de temperatura, principalmente na parte da lança exposta à elevada temperatura de sopro na ventaneira, e de velocidade, sobretudo na ponta da lança, considerando-se vários ângulos de corte da extremidade por onde sai o carvão. Para as simulações dos casos bases considerou-se corte de inclinação de 45° na ponta da lança.

Em todas as simulações o carvão foi considerado uma partícula esférica de densidade igual a 0,45 kg/m³. A força de arraste foi modelada de acordo com a relação de Schiller Naumann, levando-se em consideração ainda as forças de dispersão turbulenta e devido à gravidade. Empregou-se total acoplamento entre as duas fases coexistentes, de modo que o movimento dos sólidos sofresse efeito do gás e vice-versa. Nas simulações em que a lança ficou exposta ao fluxo de ar quente, a condutividade térmica do seu material (aço inoxidável) foi determinada a partir de dados fornecidos pelo fabricante das lanças. Suas paredes foram consideradas lisas, sem rugosidade e sua temperatura inicial foi de 50°C.

Para a abordagem lagrangeana utilizou-se nitrogênio à temperatura constante de 30°C, com injeção de partículas de carvão, cuja distribuição granulométrica foi dada pela relação de Rosin Rammler⁽⁶⁾, desenvolvida para combustíveis sólidos pulverizados. O modelo de Tabakoff foi utilizado para estimar a erosão entre as partículas de carvão e a parede interna da lança. O valor dos coeficientes de restituição paralelo e perpendicular do carvão com a parede foram 0,3 e 0,1, respectivamente. O modelo utilizado para a turbulência foi o SST e desconsiderou-se qualquer efeito térmico nessas simulações.

No sistema em que a abordagem euleriana foi empregada para a fase sólida, fixou-se um diâmetro médio de 20 µm para as partículas. A temperatura do nitrogênio utilizado para carrear o sólido disperso através da lança foi de 40°C com a velocidade de 17 m/s para o caso base. Outros valores para a velocidade foram considerados a fim de se verificar seu efeito sobre a temperatura da lança. Considerou-se o conjunto carvão/nitrogênio como sendo uma mistura heterogênea, com trocas térmicas entre as fases previstas pela relação de Ranz Marshall.⁽⁶⁾ A outra entrada, correspondente à vazão de ar quente foi modelada considerando-se N₂ a 950°C, com a velocidade de 130 m/s. Utilizou-se o modelo κ-ε para a turbulência da fase contínua.

3 METODOLOGIA

3.1 Geometria do Modelo e Dispositivo Experimental

A região de interesse para a modelagem abordada compreende a parte interna do algaraviz e da ventaneira, e a lança de PCI, conforme mostrada na Figura 1.

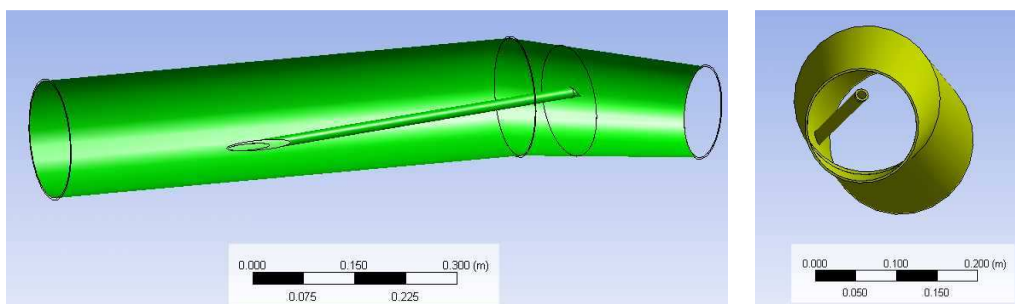


Figura 1. Desenho esquemático do conjunto algaraviz, ventaneira e lança de injeção, considerado na modelagem.

O comprimento da lança de injeção que fica exposta à elevada temperatura, inserida no algaraviz com uma inclinação de $9,24^\circ$, é de 510 mm. As medidas do *raceway* na geometria do modelo, estimadas a partir de relações empíricas⁽⁷⁻¹⁰⁾ foram: 1,20 m de profundidade, 1,30 m de altura, no máximo, e 0,90 m de largura, no máximo.

Nas simulações lagrangeanas, utilizou-se a modelagem somente da lança, normal, com incrustação e com empeno, cujos desenhos podem ser vistos na Figura 2a.

Um dispositivo experimental, cujo esquema pode ser visto na Figura 2b, foi montado para aquisição das temperaturas da parede da lança, a aproximadamente 150 mm da ponta, e do seu interior, exatamente no ponto médio da área por onde passa o fluxo de nitrogênio, a cerca de 90 mm da ponta.

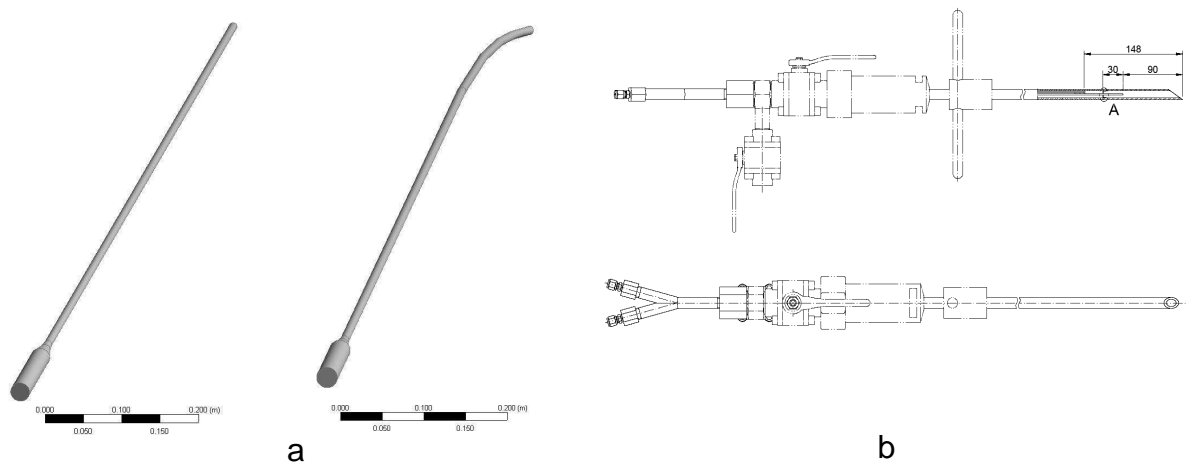


Figura 2. Perfil da geometria da lança completa (a) e desenho esquemático do dispositivo para registro das temperaturas no sistema de injeção (b).

3.2 Simulação Computacional e Aquisição das Temperaturas

A modelagem e a simulação do processo abordado neste trabalho foram desenvolvidas no *software* ANSYS-CFX®. As condições de contorno para o modelo foram adquiridas a partir do computador de processo do Alto-Forno 3 da usina de Ipatinga da Usiminas ou medidas diretamente no ambiente de operação. A fração volumétrica do sólido foi variada em algumas simulações para avaliação desse parâmetro na temperatura da parede da lança.

O experimento para aquisição das temperaturas a partir do dispositivo da Figura 2b foi realizado em aproximadamente uma hora, no mesmo Alto-Forno 3, enquanto

em operação normal, injetando-se somente nitrogênio na lança. Tais dados foram utilizados para validação do perfil térmico simulado na parede da lança.

4 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES UTILIZANDO OS MODELOS

4.1 Simulações Utilizando-se Somente a Lança de Injeção

Nas simulações para a geometria normal da lança, verificou-se que a quantidade de colisões das partículas com a parede e, conseqüentemente, a erosão na superfície interna da lança tornam-se mais elevadas com o aumento da fração volumétrica do carvão injetado. O aparecimento de incrustações origina um obstáculo ao escoamento do carvão, o que desvia seu fluxo para o lado oposto da parede, conforme mostrado na Figura 3, acentuando ainda mais o processo erosivo na lança.

Lança empenada também favorece o aumento das colisões localizadas de partículas contra as paredes internas, elevando-se a taxa de erosão principalmente no lado convexo da curvatura, indicado pela letra A na Figura 4. O nitrogênio que transporta o carvão escoam normalmente na lança empenada, porém, devido à inércia, grande parte das partículas vai em direção à parede, no ponto de curvatura, ocorrendo grande quantidade de colisões e desgaste excessivo naquela região. Na Figura 4 são mostrados os perfis da taxa de erosão obtidos a partir da simulação do escoamento do carvão carregado pelo nitrogênio em uma lança empenada.

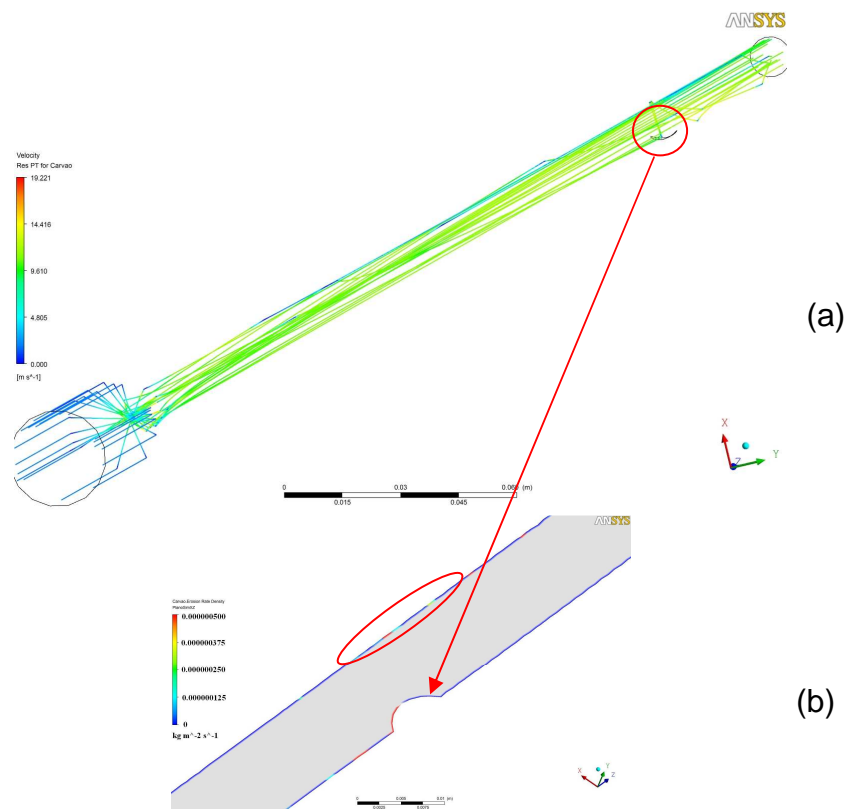


Figura 3. Trajetória de partículas (a) e erosão (b) numa lança com incrustação.

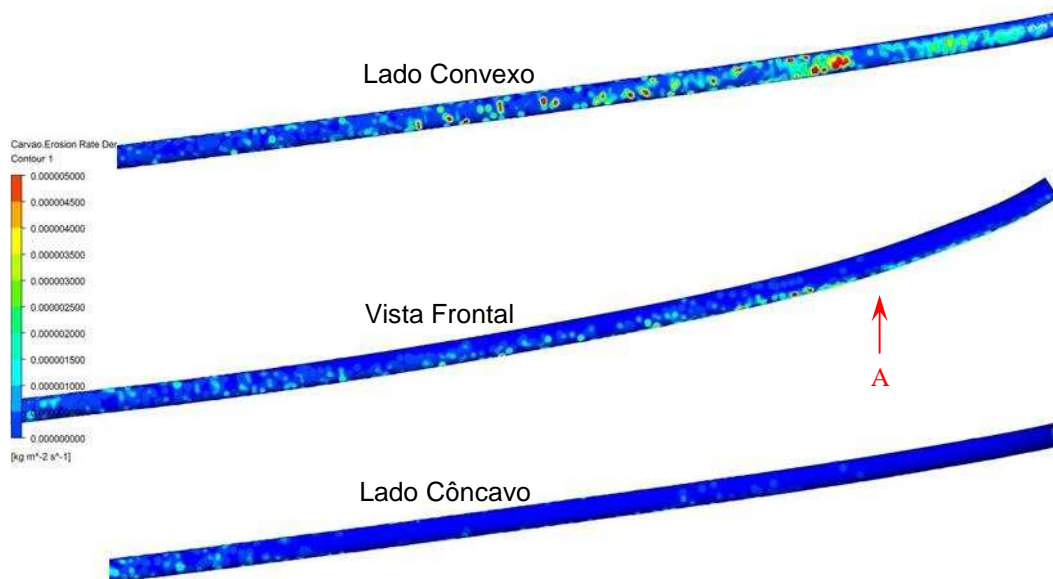


Figura 4. Perfil da taxa de erosão simulado em uma lança empenada.

No próprio ANSYS-CFX® foi possível calcular a erosão média ao longo da parede interna das lanças, cujos valores podem ser vistos na Tabela 2.

Considerando-se somente a lança sem qualquer anormalidade, foi possível verificar que ocorre desgaste da parede interna devido à erosão causada pelo cisalhamento das partículas sólidas com a superfície interna da lança. O modelo de Tabakoff, utilizado para a erosão, foi concebido para o conjunto carvão e aço normal, e não para o aço inox. Ainda assim espera-se que os efeitos qualitativos do sistema carvão e aço inoxidável sejam semelhantes daquele, porém apresentando menor desgaste em virtude desse material ser mais resistente à erosão do que o aço normal.

Tabela 2. Taxa de erosão na parede interna da lança

Configuração da lança	Vazão de carvão (kg/s)	Número de partículas (por kg de sólido)	Taxa de erosão (kg/m ² .s)
Normal	0,132	5000	$4,858 \cdot 10^{-8}$
Normal	0,132	10000	$4,889 \cdot 10^{-8}$
Normal	0,132	15000	$4,891 \cdot 10^{-8}$
Normal	0,180	5000	$6,608 \cdot 10^{-8}$
Normal	0,220	5000	$7,884 \cdot 10^{-8}$
Incrustrada	0,180	5000	$1,008 \cdot 10^{-7}$
Empenada	0,180	5000	$2,361 \cdot 10^{-7}$

Outro parâmetro que irá influenciar no desgaste da parede da lança é a elevada temperatura a que ela fica exposta, não considerada nas simulações para avaliação da erosão. À elevadas temperaturas, pode ocorrer modificação na estrutura da lança devido à difusão de carbono para o metal (fenômeno conhecido como *metal dusting*⁽¹¹⁾), fragilizando-a, podendo ocasionar furos e/ou rasgos localizados. Portanto, as trocas térmicas no sistema, principalmente a elevadas temperaturas podem acelerar o processo de erosão nas lanças.

Ressalta-se que, mesmo em operação normal, o escoamento do fluido a elevada velocidade origina o fenômeno conhecido como flambagem, fazendo com que a lança vibre, empenando-a. Além da ocorrência desse fenômeno, em certas ocasiões torna-se necessário retirar determinada lança e posteriormente inseri-la

novamente no forno, dependendo do seu estado de conservação. Normalmente, a lança empena ao ser retirada, e depois retorna para o forno já com empeno. Essas situações podem potencializar o processo erosivo, pois como visto, o desgaste da parede é muito superior para situações de lanças com empeno. Na Figura 5a pode ser vista uma fotografia de lanças que sofreram empeno, o que pode ter acelerado o processo de erosão na parede interna, e nas Figuras 5b e 5c são mostradas fotografias com detalhes de uma dessas lanças.



Figura 5. Lanças empenadas e detalhes da degradação de uma delas.

4.2 Simulações Utilizando-se o Sistema Completo

Antes de se executarem as simulações multifásicas, foram considerados casos com injeção somente de nitrogênio na lança de 10,5 mm e de 9,6 mm de diâmetros interno, a fim de se comparar a temperatura na parede da lança entre os dois diâmetros interno. De acordo com dados operacionais, a vazão de nitrogênio numa lança varia entre 0,006 kg/s e 0,012 kg/s. Na figura 6 podem ser observados perfis de temperatura na parede da lança e do fluido que escoar em seu interior, num plano transversal a cerca de 150 mm da ponta da lança. É possível verificar que a temperatura na parede da lança de 9,6 mm de diâmetro é menor do que naquela de 10,5 mm de diâmetro, para os dois casos mostrados devido à maior espessura da parede de aço inoxidável.

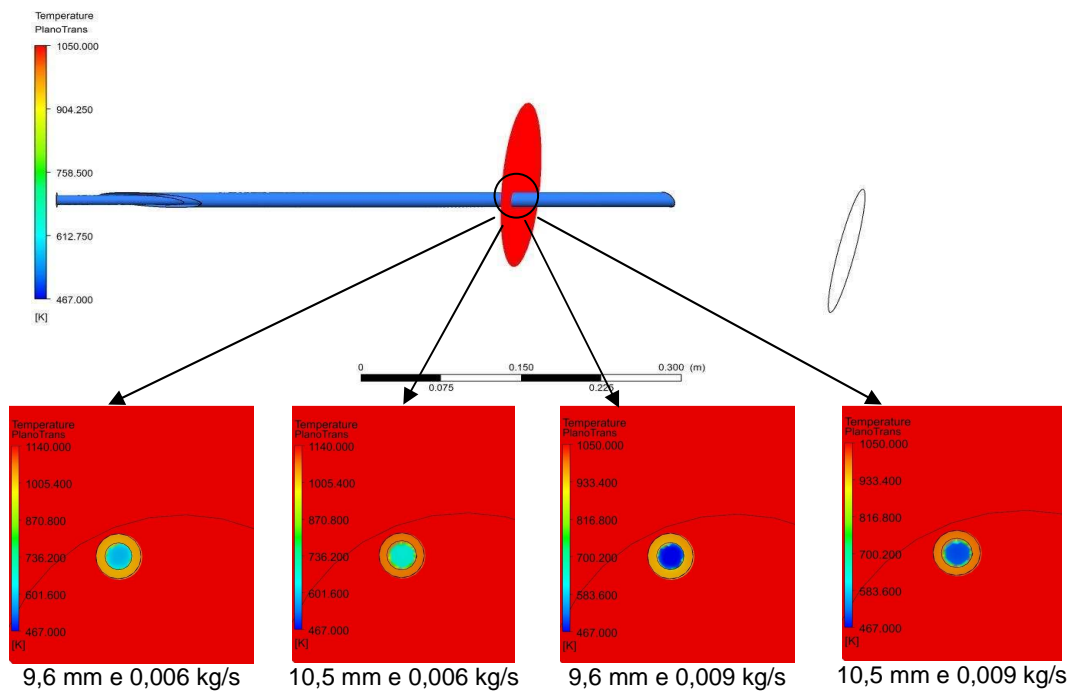


Figura 6. Perfis de temperatura na parede da lança e do fluido em seu interior.

Um plano transversal semelhante é aquele mostrado na Figura 6 foi colocado a aproximadamente 100 mm da ponta da lança para estimar a temperatura do fluido naquele ponto, com a finalidade de compará-la  obtida experimentalmente. Os valores daquelas temperaturas estimadas podem ser vistos na Tabela 3. As curvas experimentais das temperaturas registradas nos termopares do dispositivo cujo esquema foi mostrado na Figura 2b podem ser vistas na Figura 7. Comparando-se as temperaturas dos perfis simulados com a do nitrogênio obtido experimentalmente, T2 na Figura 7, estima-se que a vazão desse gás na lança durante o experimento foi de aproximadamente 0,007 kg/s, o que corresponde a velocidade de 17 m/s na entrada da lança de diâmetro de 10,5 mm para as simulações do conjunto completo.

Tabela 3. Temperatura estimada do nitrogênio a 100 mm da ponta da lança

Vazão de N2 (kg/s)	Temperatura (C)
0,006	440
0,007	373
0,008	308
0,009	262
0,012	278

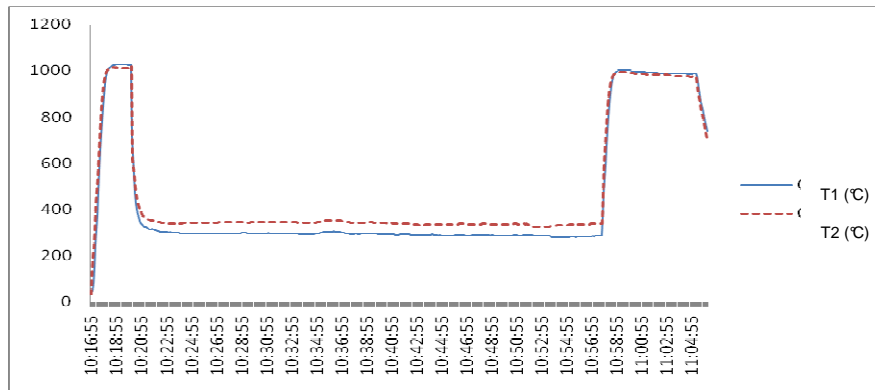


Figura 7. Gráfico com perfil de temperatura da superfície interna (T1) e do gás (T2) no interior da lança.

Verifica-se que o perfil térmico da parede obtido experimentalmente (T1 no gráfico da Figura 7) não ficou coerente com o simulado. Provavelmente isso se deve ao fato de existir uma massa metálica ao redor do termopar, utilizada para sua fixação na parede da lança, que permitia uma maior troca de calor por condução entre o ponto de medição e o termopar. Já a temperatura do nitrogênio, registrada pelo termopar colocado no interior da lança se aproximou bastante do simulado.

Quando o carvão passa a ser injetado com nitrogênio, o escoamento bifásico resultante melhora o resfriamento na lança, conforme mostrado na Figura 8. Porém, com o aumento da fração volumétrica (α), a temperatura desse combustível no ponto de encontro com o sopro, na saída do duto, diminui, o que pode ser verificado acompanhando-se a linha tracejada de número 1 na Figura 9, devido ao aumento da massa do sólido para a troca térmica com o gás. Simultaneamente, ocorre também diminuição da velocidade das partículas de carvão ao saírem da ponta da lança, o que eleva seu tempo de residência no percurso até o *raceway*. A temperatura e a velocidade do carvão ao sair da lança de injeção são parâmetros relevantes para uma boa eficiência de queima das partículas desse combustível. A diminuição da temperatura do carvão na saída da lança prejudica a sua queima dentro do *raceway*. Contudo, este fenômeno pode ser compensado, já que a redução da velocidade de saída das partículas eleva o tempo de residência dos sólidos na ventaneira e no *raceway*, diminuindo-se a quantidade de carvão não queimado no processo.

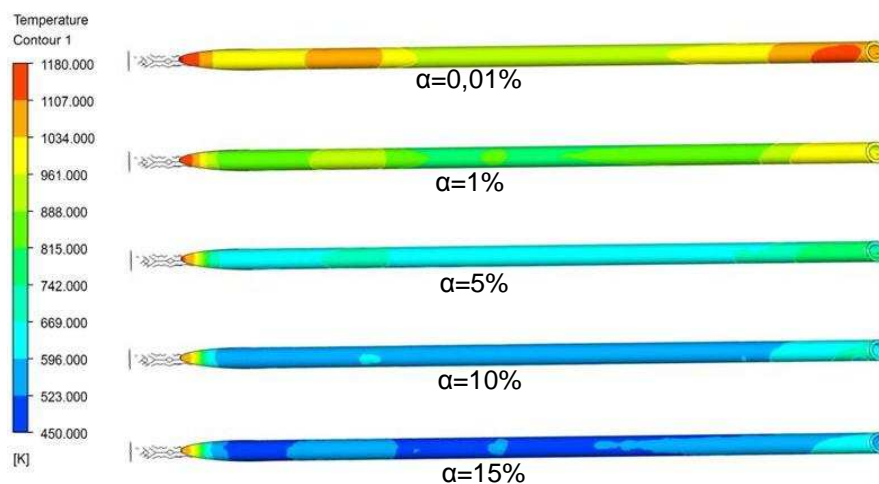


Figura 8. Perfis de temperatura na estrutura da lança com injeção de carvão.

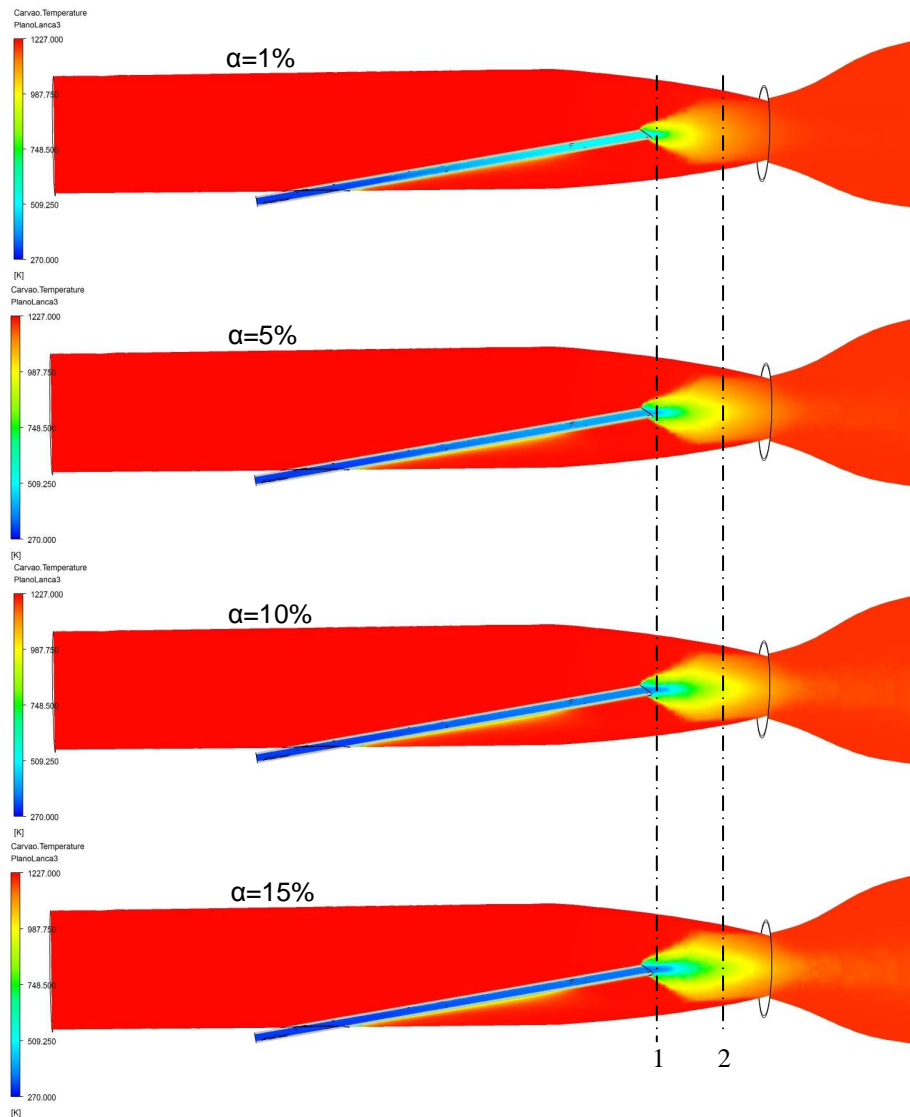


Figura 9. Perfis de temperatura do carvão ao longo da geometria.

Nos gráficos da Figura 10 é possível observar a redução da temperatura média na superfície externa da lança de injeção (10a), da temperatura (10b) e da velocidade (10c) das partículas na saída da lança, aumentando-se a fração volumétrica de carvão.

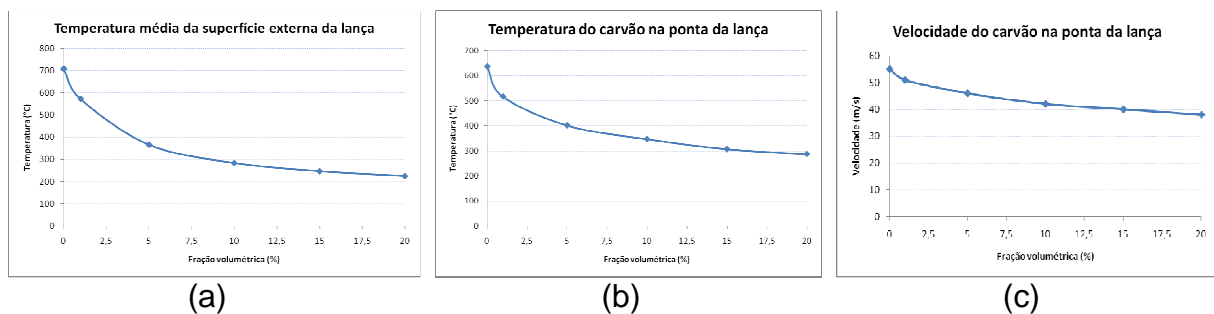


Figura 10. Variação da temperatura na superfície externa da lança (a), da temperatura (b) e da velocidade (c) do carvão na ponta da lança.

Uma alternativa utilizada para melhorar as condições de combustão das partículas de carvão é fazer um corte com determinada inclinação na ponta da lança, o que gera velocidades diferentes para as partículas que saem ao longo da superfície elíptica, conforme observado nos resultados apresentados na Figura 11. Para o corte de 15° de inclinação, a velocidade no ponto 1 é maior do que no ponto 2, porque essa inclinação está próxima daquela da lança em relação ao Algaraviz, que é de aproximadamente 10°. Assim, o carvão que sai no ponto 1 é arrastado imediatamente pelo sopro, que apresenta velocidade muito superior ao do nitrogênio que atravessa a lança. Aumentando-se o ângulo de corte até 45°, a velocidade do carvão no ponto 1 decresce em relação à do ponto 2 e à do sopro, o que aumenta o tempo de residência do combustível até o *raceway*, possibilitando uma melhor combustão das partículas. A diferença máxima entre as velocidades naqueles dois pontos se dá exatamente para o ângulo de 45°. Aumentando-se ainda mais o ângulo, a diferença da velocidade entre os dois pontos diminui, apresentando um perfil de velocidade praticamente homogêneo para o ângulo de 75°.

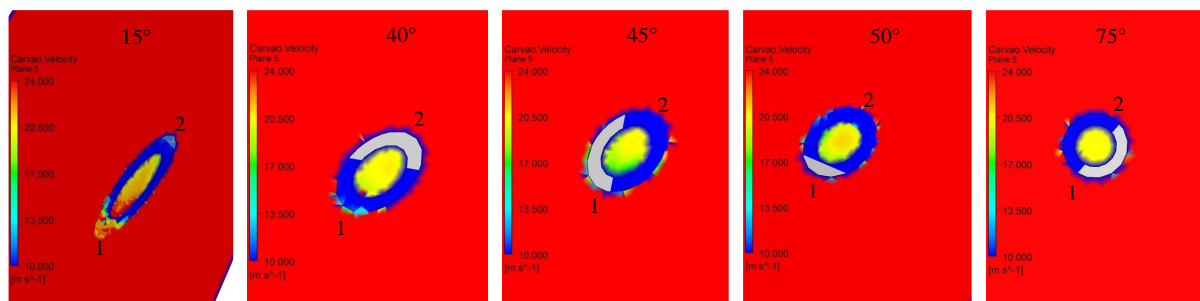


Figura 11. Perspectivas do perfil de velocidade do carvão variando-se a inclinação do corte da ponta da lança.

5 CONCLUSÃO

Ao aumentar o diâmetro interno de 9,6 mm para 10,5 mm, condição atual na Usiminas, as lanças ficam mais susceptíveis a rasgos e furos, pois, para as mesmas condições operacionais de refrigeração, nota-se um aumento da temperatura na parede da lança de diâmetro interno maior. Esse fato pode acelerar a modificação na estrutura do material e a conseqüente degradação da lança. Contudo, de acordo com os resultados do perfil térmico da parede da lança exposta à elevada temperatura no Algaraviz e na ventaneira, a atual refrigeração proporcionada pela injeção constante de nitrogênio é suficiente para manter a temperatura dentro dos limites estabelecidos pelo fornecedor do material. Com a injeção de carvão pulverizado o potencial de refrigeração do fluido bifásico se torna ainda melhor.

Regiões com empenos são pontos críticos para o processo erosivo localizado, acelerando o aparecimento de furos e/ou rasgos, ou até mesmo proporcionando a ruptura da lança. Além disso, entupimentos freqüentes seguidos de desobstruções em uma mesma lança podem originar incrustações permanentes na parede interna, que desviam o fluxo do carvão, causando desgaste localizado. De acordo com as simulações efetuadas, verificou-se que a erosão pode aumentar 52% com a formação de incrustação e 257% com o aparecimento de empeno, em relação a uma lança recém inserida no forno.

Conforme verificado a partir dos resultados das simulações, a velocidade e temperatura do carvão estão relacionadas com sua fração volumétrica e com a combustão das partículas injetadas. Para melhorar tal combustão é recomendado

cortar a ponta da lança por onde sai o carvão, com inclinação de 45°, ângulo de maior diferença de velocidade entre as partículas que saem pela superfície elíptica. É possível obter resultados mais conclusivos relacionados à otimização das quantidades de carvão e de nitrogênio e da inclinação de corte da ponta da lança com simulações mais complexas, que envolvem a combustão das partículas sólidas.

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

U_k	- velocidade da fase k (m/s);
n_k	- vetor unitário normal direcionado para fora da interface;
ρ_k	- densidade da fase k (kg/m ³);
Ψ_k	- quantidade da grandeza conservada;
ϕ_k	- termo fonte da fase k;
ϕ_i	- termo fonte da interface;
J_k	- fluxo molecular da fase k;
V	- volume (m ³);
A	- área (m ²);
\dot{m}_k	- vazão mássica da fase k (kg/s).

REFERÊNCIAS

- 1 ASSIS, P. S. Injeção de Carvão Pulverizado em Altos-Fornos. IV Simpósio Minero Metalúrgico da EE.UFMG, Belo Horizonte/MG, 1993.
- 2 OLIVEIRA, M. A. G., FERNANDES, M. V. Injeção de Carvão Pulverizado nos Altos-Fornos da Usiminas. XXV Seminário de Redução e Matérias-primas Siderúrgicas; Volta Redonda/RJ, 1994.
- 3 ASSIS P. S. Injeção de Materiais Pulverizados em Altos-Fornos. Associação Brasileira de Metalurgia e de Materiais, Belo Horizonte/MG, 2007.
- 4 PALADINO, E. E. Estudo do Escoamento Multifásico em Medidores de Vazão do Tipo Pressão Diferencial. Tese de Doutorado, Florianópolis/SC, 2005
- 5 ENWALD, E., PEIRANO, E., ALMSTEDT, A. E. Eulerian Two-phase Flow Theory Applied to Fluidization. International Journal Multiphase Flow, 22, 1996, p. 21-66.
- 6 ANSYS-CFX User's Guide. ANSYS CFX Release 11.0, December 2006.
- 7 MCCARTHY, M., TAGGART, I., ROGERS, H., GOLDSWORTHY, P., BURGESS, J. Effect of Blast Parameters and Coke Properties on Raceway Geometry in a Hot Model. Ironmaking Conference Proceedings, 1983.
- 8 RAJNEESH, S., SARKAR, S., GUPTA, G. S. Prediction of Raceway Size in Blast Furnace from Two Dimensional Experimental Correlations. ISIJ International, 44, n^o8, 2004, p. 1298-1307.
- 9 FLINT, P. J.; BURGESS, J. M. A Fundamental Study of Raceway Size in Two Dimensions. Metallurgical Transactions B, 23B, 1992, p. 267-283.
- 10 GUPTA, G. S., RUDOLPH, V. Comparison of Blast Burnace Raceway Size with Theory. ISIJ International, 46, n^o2, 2006, p. 195-201.
- 11 GRABKE, H. J. Metal Dusting. Materials and Corrosion, 54, n^o10, 2003, p. 736-746.