

DESGASTE EM BOCAIS DE LANÇA – SIMULAÇÕES CFD E CONDIÇÕES REAIS*

Breno Totti Maia¹

Fabício Silveira Garajau²

José Eduardo Mautone Barros³

Marcelo de Souza Lima Guerra⁴

Resumo

Metalurgistas e pesquisadores de aciarias a oxigênio buscam dia após dia o desenvolvimento de parâmetros operacionais com reflexos diretos em ganhos metalúrgicos e no desempenho dos equipamentos, visando aumentar a produtividade e evitando interrupções para manutenção. O principal requerimento para um convertedor a oxigênio é o conjunto de lança com bico de cobre. Recentemente a Lumar Metals apresentou cartuchos com a tecnologia Slagless que podem ser usados para substituir os bicos convencionais de cobre com expressivos resultados de processo. Alguns pontos são fundamentais para se obter um projeto de bico que tenha satisfatória vida útil, como por exemplo, a estrutura do material utilizado, o correto dimensionamento do circuito de refrigeração e o correto dimensionamento dos lavais de saída do oxigênio. O objetivo do presente trabalho é avaliar os efeitos dos parâmetros de processo: pressão e vazão e suas influências no desgaste do bico de lança devido ao mau dimensionamento dos lavais ou quando operando em condições abaixo da especificada. Os resultados mostram que para cada conversor com um perfil operacional único, o projeto do bocal específico é o que garante os melhores ganhos metalúrgicos e aumento da vida útil do bico.

Palavras-chave: Bico; CFD; Vazão; Pressão; Contra-pressão.

TIP NOZZLE WEAR – CFD SIMULATIONS AND REAL CONDITIONS

Abstract

Steelmakers and researches in BOF's shops try to find every day better operational parameters with direct metallurgical gains and equipments performance, increase productivity, avoid maintenance time. In BOF, the mainly device are lance and lance tip, specially copper parts. Nearly Lumar Metals showed the cartridge concept called Slagless replacing lance tips and improve gains in life and downtime to clean skulls. Other important point is the lance water cooling system, to keep the structural conditions of the nozzles. This work intends check the effects of process parameters like: pressure and flow and influences at wear due wrong nozzles dimensions when below the correct conditions. The results show that for each converter there is a unique operational profile and then specific nozzle dimensions.

Keywords: Nozzle; CFD; Flow; Pressure; Back pressure.

¹ Engenheiro Metalurgista e Doutor Pesquisador, Lumar Metals, Sócio da ABM, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Mecânico e Pesquisador, Lumar Metals, sócio da ABM, Santana do Paraíso, MG, Brasil.

³ Professor PhD., Depto. Engenharia Mecânica, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico e Pesquisador, Lumar Metals, sócio da ABM, Santana do Paraíso, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A lança de oxigênio é um equipamento utilizado em convertedores a oxigênio, constituído por tubulações de entrada de oxigênio, divisor de água e tubo externo contendo em uma das extremidades o bico de lança feito em cobre fundido, forjado ou centrifugado com elevada pureza e garantindo uma extrema eficiência na condutividade térmica. A Figura 1 apresenta uma típica lança de sopro em convertedores BOF.

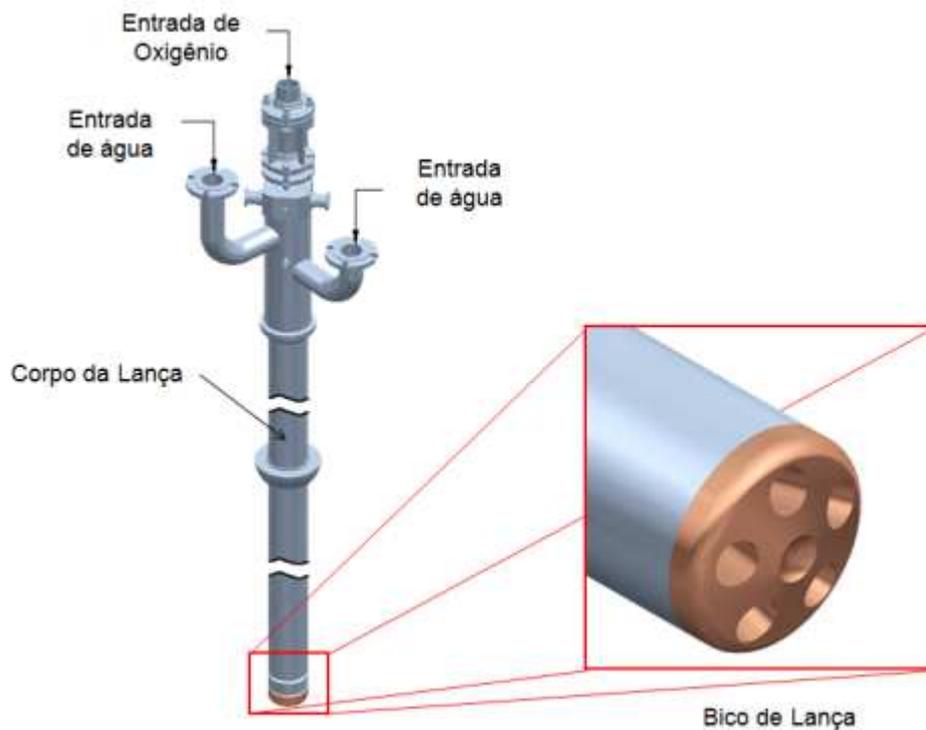


Figura 1 - Montagem típica de lança de sopro em convertedores a oxigênio [1].

A Figura 2 mostra um desenho esquemático em corte de um bico de lança típico, é apresentado os bocais de passagem do oxigênio bem como os canais de entrada e saída de água de refrigeração e a saída de oxigênio supersônico, acelerado através do Bocal ou Furo Convergente-Divergente ou bocal, objeto de estudo deste trabalho.

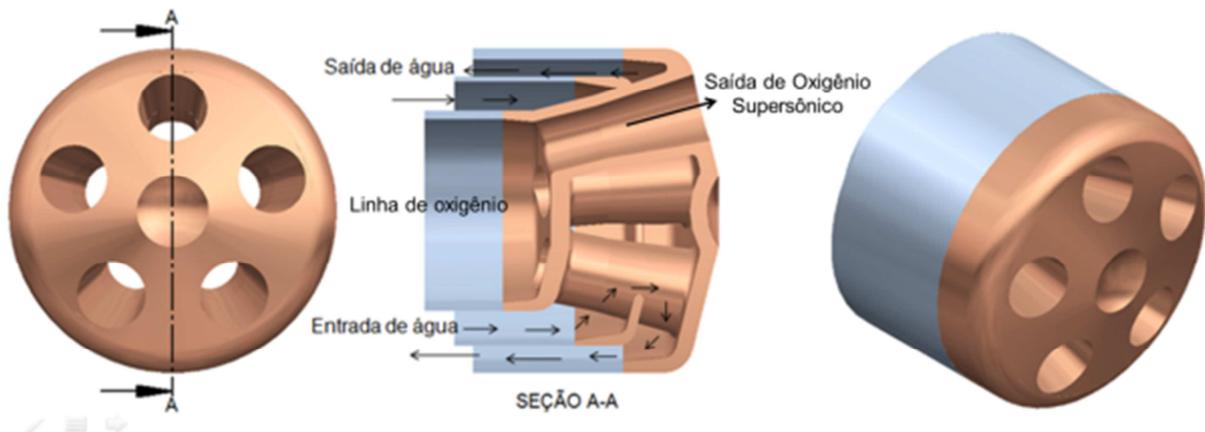


Figura 2 - Desenho esquemático de um bico de lança.

A Figura 3 apresenta vários bicos, destacando o mecanismo de desgaste sofrido por cada um.

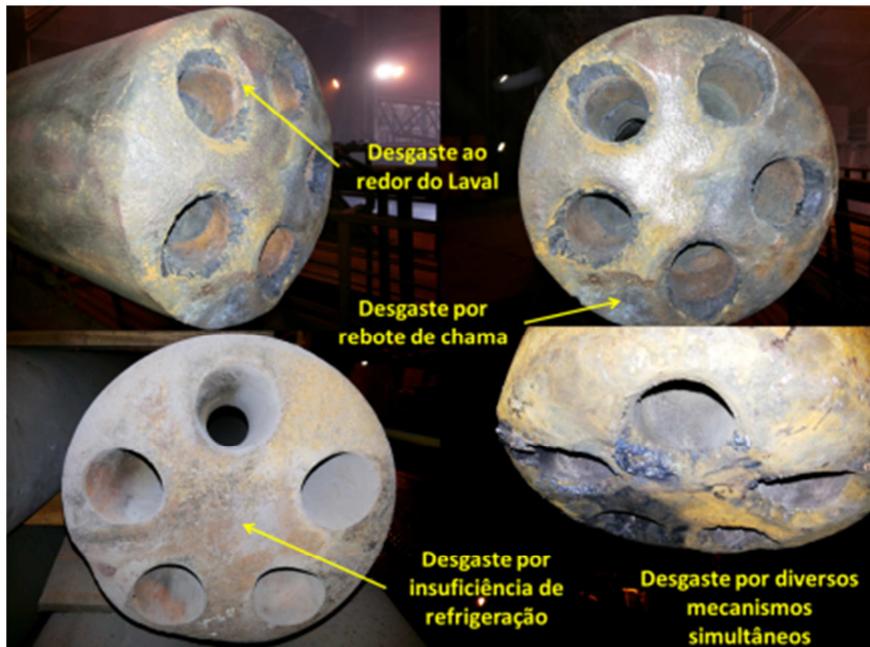


Figura 3 – Principais ocorrências geradoras de falha em bicos de lança.

A Figura 4 apresenta o resultado do estudo em CFD [1] para otimização da refrigeração. O bico presente na Figura 4b, corresponde ao estudo térmico do bico apresentado na Figura 3.

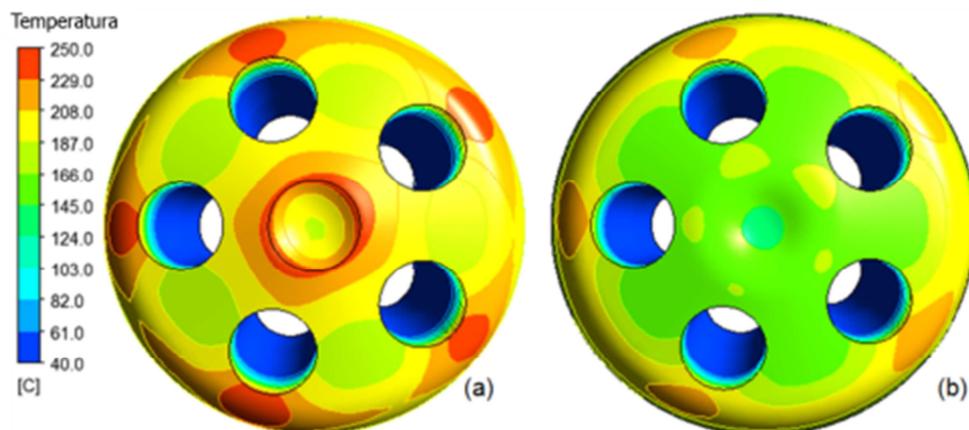


Figura 4 – Simulação computacional vazão de água em bicos: a) projeto original e b) após estudo CFD [1].

Observa-se que mesmo com refrigeração otimizada ainda existe a possibilidade de ocorrer desgaste ao redor do laval e/ou por rebote de chama. Este segundo está mais ligado ao processo, e necessita de melhor separação de sucata, controle de ignição, composição química do gusa, etc. O presente trabalho tem como principal objetivo estabelecer uma metodologia aplicável para dimensionamento dos lavais do bico, para reduzir o desgaste ao redor do laval. Para isto é necessário compreender melhor sobre o escoamento supersônico, ondas de choque e ondas de expansão e escoamentos sub/sobre expandido.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A quantidade na qual um gás pode ser comprimida é dada por uma propriedade específica chamada por compressibilidade e descrita pela equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

$$\tau = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad 1$$

Onde: $d\rho$ - variação da massa específica; ρ - massa específica; τ - compressibilidade do fluido; dp - variação da pressão.

Quando o escoamento é tratado como compressível o número adimensional de Mach (M) (equação 2), que relaciona a velocidade local do escoamento (v) com a velocidade do som no meio (a) é um importante fator, pois se correlaciona com todas as variáveis termodinâmicas quando o regime é compressível [3], expresso pelas equações 2 e 3.

$$M \equiv \frac{v}{a} \quad 2$$

$$a = \sqrt{kRT} \quad 3$$

Onde: a - Velocidade do som no meio (m/s), k - Razões dos calores específicos (c_p/c_v), R - Constante dos gases ideais, T - Temperatura.

Enquanto a primeira lei da termodinâmica estabelece a conservação de energia em qualquer transformação, a segunda lei estabelece condições para que as transformações termodinâmicas possam ocorrer. Considerando-se um escoamento isentrópico, obtém-se a seguinte relação entre ρ (massa específica), P (Pressão) e T (Temperatura) [2] como propriedades correlacionadas e em relação ao Número de Mach, conforme as equações 4 e 5.

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^k = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{k/(k-1)} \quad 4$$

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{k/(k-1)} \quad 5$$

A equação relaciona a propriedade do escoamento em algum ponto com a sua condição estagnante, a qual considera velocidade de escoamento igual ou próxima a zero.

Shapiro e Moran [4] descrevem a onda de som como uma onda de pressão que provoca uma pequena perturbação que propaga através de um gás, líquido ou sólido, com uma velocidade " v_s " e que depende das propriedades do meio. Considerando a variação na seção transversal do duto, e combinando com as relações previamente estabelecidas obtém a equação 6:

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dv}{v} \times (1 - M^2) \quad 6$$

Onde: A – Área e v - Velocidade.

A relação de áreas pode ser relacionada com o número de Mach pela equação 7.

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[\left(\frac{2}{k+1} \right) \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{(k+1)}{2(k-1)}}$$

7

Onde: A^* representa a área onde Mach igual 1, também conhecida como garganta.

Assim, é possível relacionar o numero de Mach, relações de Pressão, Temperatura e Massa específica à variação de áreas no escoamento compressível [5], apresentado pela Figura 5.

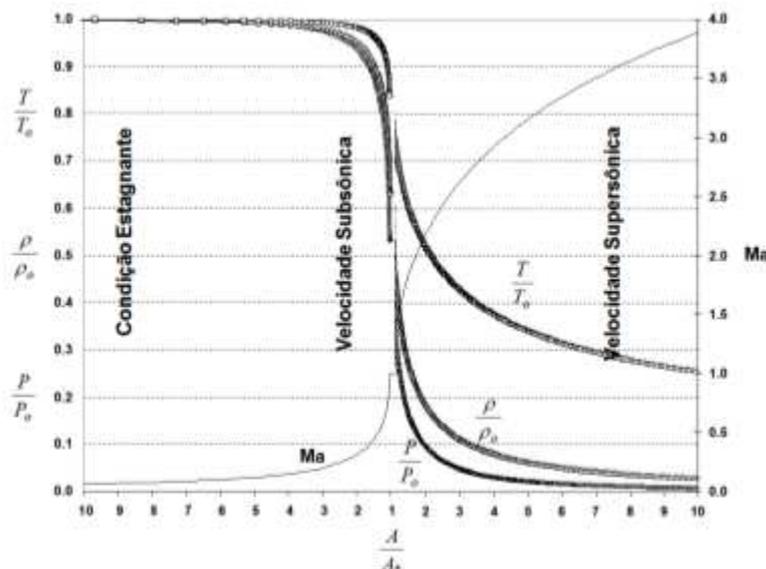


Figura 5 - Variação das propriedades do fluxo com a variação de A/A^* [6].

A Figura 6 representa as linhas de corrente de cada um destes escoamentos. Nota-se que o escoamento compressível subsônico é representado qualitativamente (mas não quantitativamente) como um escoamento incompressível com variações bem suaves na distribuição das linhas de corrente em todo o perfil do objeto.

A Figura 6(d) e (e) apresentam o escoamento supersônico com a presença de algumas ondas de choque, as quais realizam o trabalho de "avisar" ao escoamento a presença de objetos para que a velocidade local seja reduzida possibilitando o contorno do escoamento ao redor do objeto. No entanto em escoamentos transônico, Figura 6(b) e (c), a presença das ondas de choque também ocorrem, porém com menor intensidade [2]. Pode-se resumir que até Mach 0.8 o escoamento é subsônico, sem presença de ondas de choque, de 0.8 a 1.2 o escoamento é transônico com poucas ondas de choque ou quase inexistente. Acima de 1.2 o escoamento é supersônico com formação de ondas de choque estáveis, e Mach acima de 5.0 o escoamento é hipersônico com ondas de choque muito intensa.

A onda de choque consiste em uma pequena região muito fina, quase sempre idealizada como região de descontinuidade, onde ocorre a grandes variações das propriedades do escoamento. Ela se propaga no fluido e não é necessariamente estacionária. Em geral todas as propriedades como pressão, velocidade, densidade, etc. são descontínuas através da superfície [7,8]. Podem ser classificadas em duas categorias: Oblíquas (menor intensidade, normalmente mantém o escoamento supersônico) e Normal (maior intensidade, escoamento sempre torna-se subsônico).

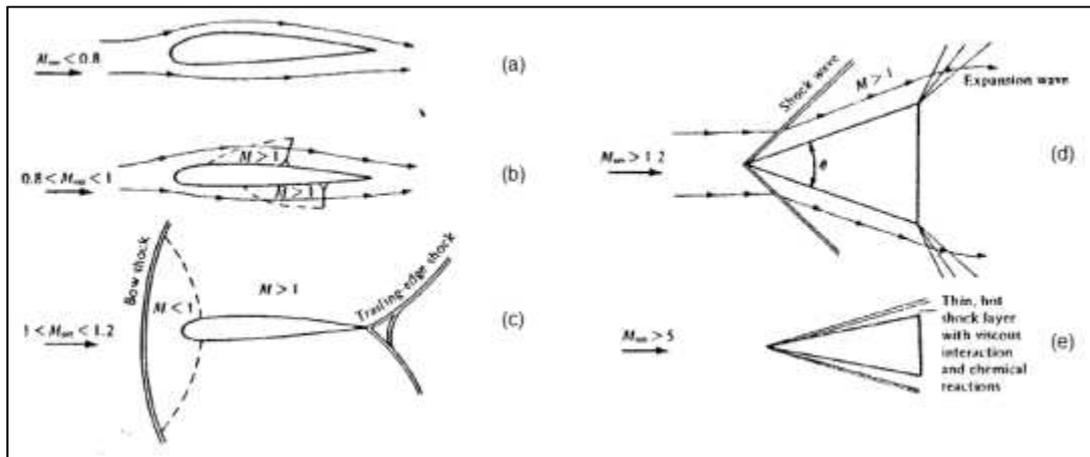


FIGURA 6 - Diferentes regimes de escoamento [2].

Ao começar a desenvolver velocidades supersônicas, o escoamento passa a não ser mais afetado por variações percebidas em regiões à frente da garganta, no sentido da saída do bocal. Quando a pressão de projeto é igual a pressão de trabalho e não há onda de choque em seu interior, o bocal atinge um regime de operação dito de expansão ótima (Figura 7b).

Quando o bocal supersônico opera em vazão inferior ao projeto, a pressão ambiente é superior ao projeto, nesse regime a razão de áreas será maior que a ideal para aquela pressão ambiente, e o escoamento não precisa de toda extensão do bocal divergente para se expandir. Este regime é conhecido como superexpandido (overexpanded), Figura 7a. Neste caso podem ocorrer duas situações. A primeira quando a pressão ambiente é muito maior que a pressão de saída, ocorrendo o descolamento do escoamento na parte divergente. O diâmetro de saída do jato torna-se menor que do bocal. Se o escoamento é permanente a separação é axialmente simétrica. Na região central, o escoamento ainda é supersônico, mas rodeado por uma região anular de escoamento subsônico. A operação é crítica caso o escoamento volte a colar na parede do bocal, pois neste caso as cargas laterais no bocal tornam-se potenciais de falha.

O outro regime de operação é conhecido como subexpandido (underexpanded), Figura 7c, que ocorre quando a vazão de operação é superior a vazão de projeto. Neste caso o bocal tem uma razão de áreas menor que a ideal, ou seja, não tem a extensão suficiente para expansão ótima. O restante da expansão se dará fora do bocal e as ondas de choque normais na saída são substituídas por ondas de choque oblíquas, partindo de suas bordas. Os valores dos parâmetros de desempenho são menores que da expansão ótima.

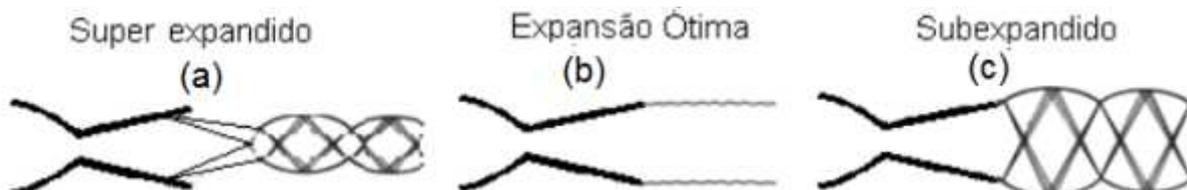


Figura 7 – Tipos jato: a) super-expandido, b) expansão ótima e c) sub-expandido [2].

Para o estudo do comportamento das ondas de choque na saída de bocais supersônicos, foi adotado uma linha de estudo utilizando simulação computacional através do Software comercial Ansys CFX-14, que trabalha com equações

diferenciais parciais discretizadas resolvidas pelo método Multi-Grid. As simulações foram conduzidas com referência à metodologia utilizada no artigo de Maia *et al.* [9]. As etapas de execução do trabalho no software ANSYS CFX-14, envolveram nos seguintes passos:

- desenho da geometria do domínio a ser estudado;
- geração de uma malha de volumes finitos a partir da geometria desenhada;
- definição das condições de contorno do problema (entradas, saídas etc.) e das propriedades físico-químicas dos materiais envolvidos;
- definição do método de resolução de acordo com a etapa da simulação;
- resolução do problema definido acompanhando as curvas de resíduos;
- avaliação da adequação da malha;
- refino da malha e, quando necessário, execução de nova simulação; e
- análise dos resultados em termos de perfis de pressão, temperatura, densidade e número de Mach.

O resíduo especificado foi de 10^{-6} , ou seja, o erro não pode ser maior que 0,0001%. O método de resolução utilizado foi o *High Resolution* para obter uma solução mais acurada. Nas simulações foram consideradas as propriedades do oxigênio puro, considerado gás ideal e uma condutividade térmica de 0,02674 W/(m.K). Como critério de convergência um erro residual inferior a 10^{-6} no esquema *High Resolution*. O domínio utilizado nas simulações está apresentado na Figura 8.

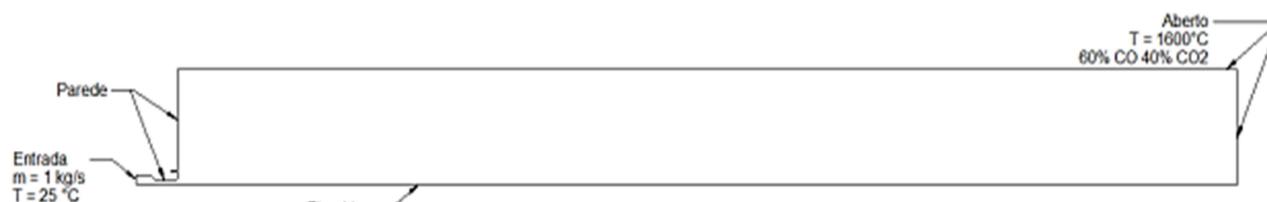


Figura 8 – Condições de contorno para simulação dos jatos.

No modelo de turbulência κ - ϵ padrão, a viscosidade turbulenta é calculada pela equação 8, onde C_μ é 0.09, constante. No presente trabalho, o modelo de turbulência utilizado foi o modelo κ - ϵ adaptado para jatos supersônicos em ambientes quentes, sugerido por Alam *et al.* [10] onde, o C_μ é modificado conforme as equações 9, 10, 11 e 12. Assim os efeitos da compressibilidade e temperatura, que afetam o número de Mach, são considerados.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad 8$$

$$C_\mu = \frac{0.09}{C_T} \quad 9$$

$$C_T = \left[1 + \frac{1.2 T_g^{0.6}}{1 + f(M_\tau)} \right] \quad 10$$

$$T_g = \frac{|\nabla T_t| (k^{3/2} / \epsilon)}{T_t} \quad 11$$

$$M_\tau = \sqrt{\frac{2k}{a}} \quad 12$$

Para avaliar o efeito da geometria do bocal, três geometrias de bocal foram comparadas, conforme apresentado na Figura 9.

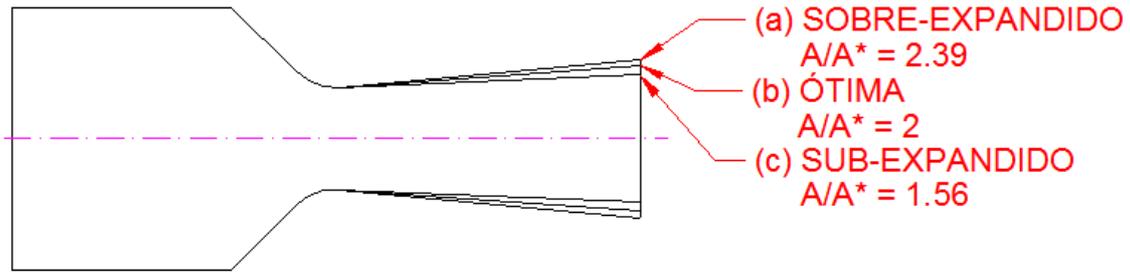


Figura 9 – Geometrias de jato testadas: a) sobre-expandido, b) ótima e c) sub-expandido.

A área da garganta foi mantida nas três simulações, alterando apenas a área da saída. A vazão permaneceu constante, e em função da manutenção da área da garganta, a pressão interna foi mantida constante, com variação de menos de 0,1% entre as três simulações. Com a vazão mantida, alterando apenas a geometria do escoamento, a formação das ondas de choque e expansão é relacionada à geometria do bocal.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das simulações computacionais foram separados em três condições de análise: Numero de Mach, Perfil de temperatura e Perfil de pressão. Parâmetros estes que são capazes de caracterizar um jato supersônico. Os resultados são apresentados na Figura 10a, 10b e 10c, na mesma sequência de geometria da Figura 7.

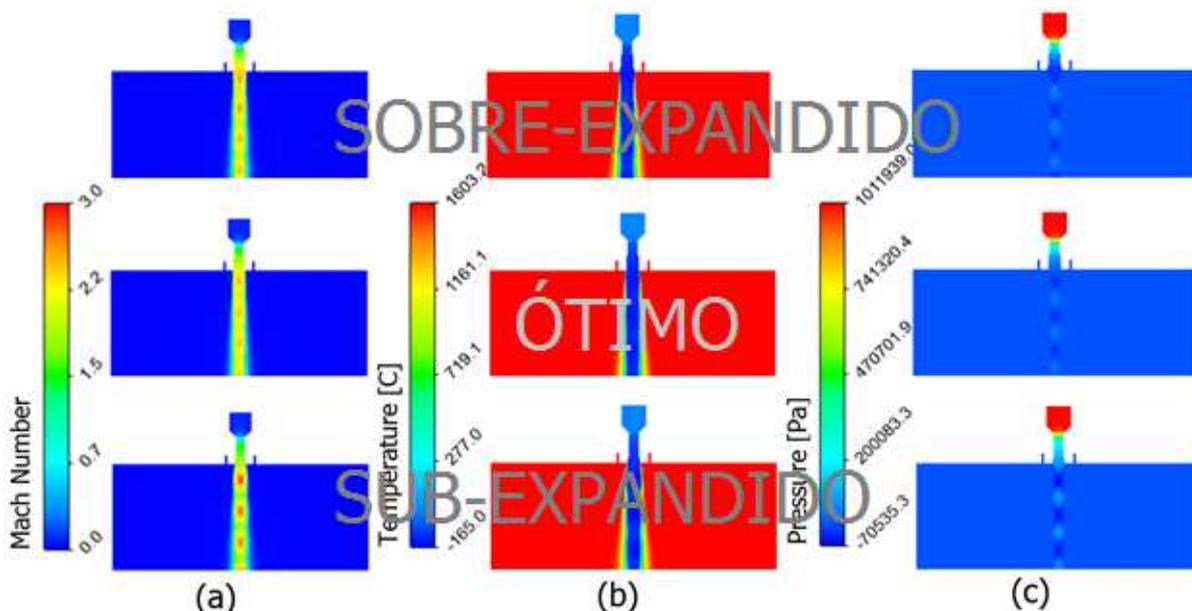


Figura 10 – Perfil do Número de Mach, Temperatura e Pressão para as condições sobreexpandida, ótima e subexpandida.

É possível observar que as ondas de choque e expansão a frente do bocal sofrem consideráveis modificações quando se altera a geometria do bocal. Na Figura 10a, observa-se que na condição ótima (imagem central), os cristais de choque são de menor intensidade (quanto mais vermelho, mais intenso), sendo que a maior intensidade foi alcançada pelo bocal subexpandido.

Na Figura 10b são apresentados os resultados do Perfil de temperatura, onde não se podem observar variações consideráveis devido ao grande gradiente de temperatura do ambiente para o jato.

Na Figura 10c apresentam-se os resultados do Perfil de Pressão. Os cristais em azul claro a frente do bocal indicam compressões do jato, quanto maior e mais claro, mais intenso são as compressões sofridas pelo jato. Observa-se que novamente o bocal subexpandido sofreu as maiores compressões. Como a pressão do jato é superior a pressão do ambiente, existe a tendência do mesmo ao ser despachado do bocal tentar “preencher” o ambiente ao seu redor. Esse desvio de direção é limitado pela própria resistência da atmosfera gerando as zonas de compressões apresentadas na figura 10c.

No entanto a maior intensidade das ondas de choque a frente do bocal, podem não indicar menor eficiência dos jatos supersônicos. Um fator muito importante, é conhecer a velocidade no centro do jato para cada uma das condições e compará-las, conforme apresentado na Figura 11.

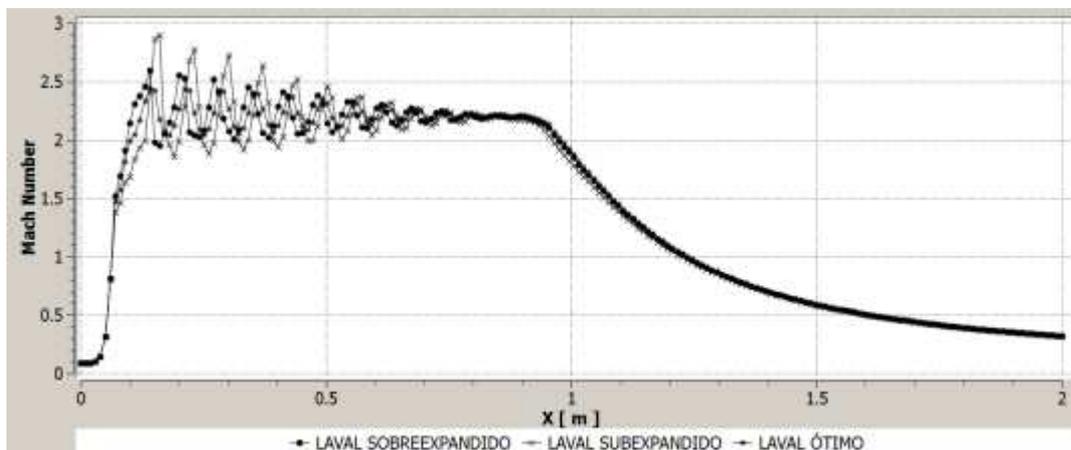


Figura 11 – Comportamento da velocidade ao longo do eixo do jato.

Como se pode ver, a velocidade do núcleo potencial do jato, responsável por realizar a agitação do aço líquido o qual está relacionado com a eficiência de descarburização do banho, sofreu alterações inferiores a 1% para as relações de área x pressão estudadas.

Entretanto, a escala de pressão utilizada na Figura 10b, não é possível observar a região da saída do bocal, onde normalmente acontece o desgaste. Ao se restringir a escala de pressão entre 0 a 5000 Pa, é possível notar a região exata onde o bocal supersônico permanece pressurizado para cada uma das situações, conforme apresentado na Figura 12.

Como se pode observar quando se trabalha com bocais sobre-expandidos, uma região de baixa pressão invade o interior do bocal, permitindo com que o calor presente no ambiente externo atinja a quina do bocal. Isto explica o porque de alguns bocais supersônicos possuem maior desgaste na saída, quando comparado a outros. Quando o bocal opera na condição ótima, a linha de pressão é ancorada exatamente na saída do bocal, levemente expandida para o exterior do ambiente. Já quando o bocal opera em condições sub-expandida, uma região à frente do bocal é pressurizada, reduzindo qualquer possibilidade de se penetrar ondas de calor que fragilizam o material na saída do bocal.

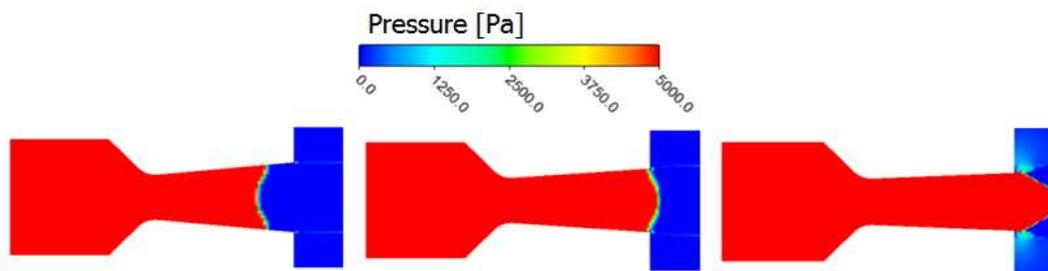


Figura 12 – Comportamento do jato entre pressões de 0 a 5000Pa sendo a) sobre-expandido, b) ótima e c) sub-expandido.

Ao observar o estudo em CFD, propôs realizar um teste prático, onde um bico com desgaste na saída do bocal era comumente observado. O bocal foi redimensionado, para que as vazões durante a operação não atingissem as faixas de sub-expansão. O resultado obtido com a mesma quantidade de corrida é apresentada pela Figura 13. Observa-se que o resultado foi uma considerável redução do desgaste na saída do bocal, extendendo a vida do equipamento que antes era retirado de operação por excesso de desgaste nessa região.



Figura 13 – Aspecto de bicos de lança após redimensionamento dos bocais: a) sobre-expandido. Vida 179 corridas, b) sub-expandido. Vida 691 corridas.

Variar a vazão ao longo do processo é prática comum, como durante os períodos de realização de medidas por sublança, redução de vazão devido projeções de materiais incandescentes para o exterior do convertedor e mesmo redução de vazão devido ao perfil de sopro para alcance de resultados químicos, notadamente o fósforo. Essas variações torna inviável nos processos de refino primário dos aços o

desenvolvimento de jatos de expansão ótima, conduzindo para o dimensionamento de jatos sub-expandidos como alternativa para compensar as variações de processo e prolongar a vida do bocal.

O presente estudo mostra que o laval deve ser dimensionado evitando que as menores vazões de operação não atinjam regimes de sobre-expansão do bocal, para que o desgaste na saída não ocorra, reduzindo o tempo de vida do equipamento.

4 CONCLUSÃO

O estudo em CFD foi de grande valia para que o estudo alcançasse o resultado esperado, o mesmo apresentou grande acurácia para representar o desgaste na saída do bocal, sendo as principais conclusões do trabalho:

- O dimensionamento correto do bocal é peça fundamental para reduzir os níveis de desgaste na saída do bocal, além de reduzir oxidações excessivas e melhor eficiência de descarburização do banho metálico;
- É importante considerar os parâmetros de processo ao dimensionar um bocal supersônico;
- Jatos de expansão ótima são vulneráveis as variações dos processos metalúrgicos;
- Jatos sub-expandidos provocam o desgaste prematuro dos bocais supersônicos;
- Jatos sobre-expandidos geram número maior de zonas de compressão;
- Não existe diferença significativa no comprimento do jato devido ao dimensionamento do bocal;
- Existe aumento de vida significativo do bocal quando considerado jatos sub-expandidos;

Agradecimentos

Os autores a Lumar Metals pelo incentivo a pesquisa. Ao Bruno Orlando de Almeida Santos, amigo eterno!

REFERÊNCIAS

- 1 MAIA, B. T.; SANTOS, B. O. A., GARAJAU, F. S., GUERRA, M. S. L., CFD SIMULATIONS FOR WATER FLOW IN LANCE TO BOF, 45° Seminário de Aciaria Internacional. Porto Alegre, May 2014.
- 2 ANDERSON, J. D. Fundamentals of Aerodynamics. 1 ed. New York: McGRAW Hill, 1984
- 3 STASCHOWER, M., MOREIRA, J. R. S., Estudo Experimental de Escoamento de Gases em Bocais Convergente Divergente. São Paulo: Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, 2002. (Iniciação Científica da Escola Politécnica de São Paulo)
- 4 SHAPIRO, H. N., MORAM, M. J., Fundamentals of Engineering Thermodynamics. Ed. New York: John Wiley & Sons, 1988. P.417-435.
- 5 NASCIMENTO, L. M., Estudo do Efeito da Pressão e da Geometria de Bico de Lança no Comportamento Supersônico do Oxigênio através de Análise por CFD. Escola de Engenharia da UFMG, 2010. (Trabalho Final de Curso em Engenharia Metalúrgica).
- 6 GLASS, D. R., SMITH, G.C., Nozzle Theory. In: BOF Steelmaking. Volume three: Design. New York: The Iron and Steel Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc, 1976. Cap.8.

- 7 THOMPSON, P. A. Compressible Fluid Dynamics. New York: McGRAW Hill, 1972
- 8 SMITH, G. C., Multiple Jet Oxygen Lances –Theoretical Analysis and Correlation With Practice. Journal of Metals. P.846 – 851, jul.1966.
- 9 MAIA, B. T., BARROS, J. E. M., NASCIMENTO, L. M., GUERRA, M. S. L., TAVARES, R. P., Simulação Numérica do Sopros de Oxigênio através de Bocal Supersônico. Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração v. 9, n.1, jan.-mar. 2012.
- 10 ALAM, M., NASER, J., BROOKS, G., FONTANA, A. Computational Fluid Dynamics Modeling of Supersonic Coherent Jets for Electric Arc Furnace Steelmaking Process. Metallurgical and Materials Transactions B, volume 41B, p.1354-1367. Dec. 2010.