

EFEITO DA PRESSÃO AMBIENTE E DA TEMPERATURA DO OXIGÊNIO SOBRE A PENETRAÇÃO DE JATO NO BANHO METÁLICO NO BOF*

Breno Totti Maia¹

Fabício Silveira Garajau²

Marcelo de Souza Lima Guerra³

Daniel Augusto G. de Carvalho⁴

Roberto Parreiras Tavares⁵

Resumo

Os convertedores BOF, em função das condições operacionais e mesmo de sua localização, sofrem variações de parâmetros cujos seus efeitos sobre o metal líquido nem sempre são considerados. O presente trabalho investigou dois aspectos: a pressão ambiente no interior do convertedor e a temperatura do oxigênio no reservatório estagnante. Os resultados mostram que a temperatura de oxigênio apesar de alterar as propriedades de saída desse gás tem pouca influência na penetração de jato. Já a pressão ambiente do BOF tem grande influência na penetração de jato, e leva um dilema nos dimensionais de bocais de lança relativo aos jatos subexpandidos e sobreexpandidos.

Palavras-chave: Pressão do BOF; Penetração de jato; Temperatura oxigênio.

BOF PRESSURE AND OXYGEN TEMPERATURE EFFECTS OVER JET PENETRATION

Abstract

BOF, due to operational conditions and location, suffer variations in the parameters whose effects on the liquid bath are usually neglected. The present paper investigated mainly two aspects: inner BOF pressure and oxygen temperature in the stagnant reservoir. The results shown that oxygen temperature changes properties like density and velocity but has small influence on jet penetration. The BOF pressure has significant influence on jet penetration and creates a new dilemma regarding nozzles dimensions considering overexpanding and underexpanding jets.

Keywords: BOF pressure; Jet penetration; Oxygen temperature.

¹ Eng. Metalurgista, Doutor Pesquisador da Lumar Metals, Sócio da ABM. Belo Horizonte, MG, Brasil;

² Eng. Mecânico e Pesquisador da Lumar Metals, sócio da ABM. Ipatinga, MG, Brasil;

³ Eng. Mecânico e Pesquisador da Lumar Metals, sócio da ABM. Ipatinga, MG, Brasil;

⁴ Eng. Metalurgista, Engenheiro Pesquisador thyssenkrupp CSA. Santa Cruz, MG, Brasil;

⁵ Sócio da ABM; Engenheiro Metalurgista; Professor Doutor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A produção de aço através da rota BOF tem como principal componente dessa transformação a utilização de oxigênio para promover o refino do banho metálico rico principalmente em carbono. A injeção oxigênio é feita através de jatos supersônicos. Para obter a vazão desejada é necessário domínio sobre o escoamento de fluidos compressíveis. Os conceitos envolvidos em jatos sônicos têm origem nas equações de conservação de energia, conservação de massa e equações de estado aplicadas em sistemas no estado estacionário, considerado o oxigênio como gás ideal. A equação de conservação de energia estabelece uma relação entre a velocidade do fluido, a mudança de energia potencial, a energia associada ao nível de pressão e o trabalho feito pelo fluido. São feitas simplificações: tubo na horizontal, regime turbulento, desprezando os efeitos das forças de fricção e, finalmente, assumir que nenhum trabalho nas vizinhanças é realizado. Além dessas simplificações, para fluidos compressíveis, a equação é diferenciada em termos da velocidade média, considerando o escoamento unidimensional. Desta equação ficam estabelecidas relações entre a velocidade, pressão e densidade, que necessitam da introdução de outras relações para compor um sistema de equações. SHAPIRO et al.^[1] 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. Assim, aplicando o princípio de conservação de massa para perturbação provocada por esta onda sonora é possível estabelecer uma relação entre a velocidade e a densidade. Através de um balanço forças, ainda neste ambiente, fica estabelecida uma relação entre a variação da velocidade com a variação da pressão. Considerando a variação na seção transversal do duto, e combinando com as relações previamente estabelecidas obtêm-se:

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

Onde “ Ma ” – número adimensional de Mach, “ A ” – Área e “ v ” = Velocidade ($m.s^{-1}$). O número adimensional de Mach representa uma relação entre a velocidade do fluido e a velocidade do som no meio. A Figure 2 apresenta a evolução da velocidade de subsônica a supersônica em relação à área.

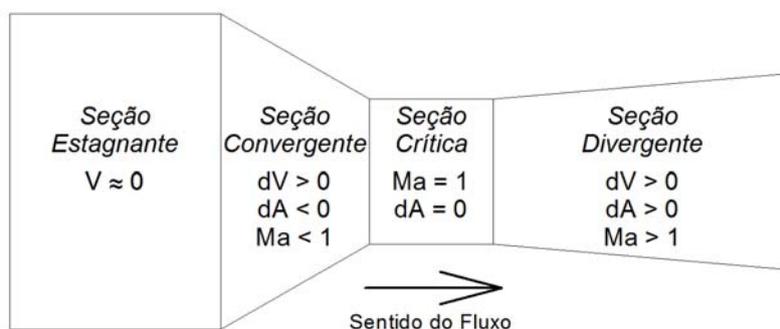


Figure 1- Entrada e saída de um bocal supersônico (NASCIMENTO^[2]).

As variações das propriedades do gás podem ser expressas na forma gráfica em função do número de Mach, conforme visto na Figure 2. O desenvolvimento das expressões relacionando a pressão, temperatura e densidade do gás é trabalhoso e considera um balanço de energia em um processo adiabático e isentrópico

forneendo relações entre dois pontos quaisquer ao longo do duto. As mudanças nas propriedades do fluxo são graduais em todos os casos, exceto quando a relação A/A^* , onde A^* é denominada de área crítica ou garganta ou mínima, e está próxima da unidade e as características do fluxo são alteradas rapidamente com pequenas alterações na seção. A redondeza desta região é chamada de transônica, pois ocorre a passagem do regime subsônico para o regime supersônico. Os cálculos são extensos e trabalhosos e os resultados representam valores médios ao longo do eixo do comprimento do jato, não sendo possível avaliar as variações de propriedades na seção transversal do bocal.

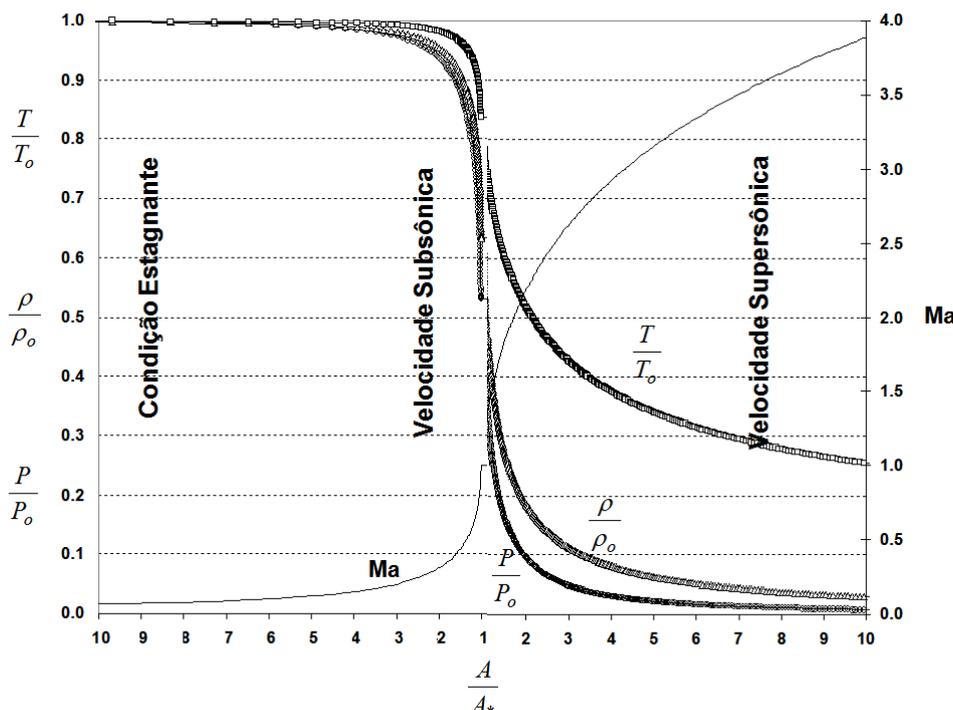


Figure 2 - Variação das propriedades do fluxo com a variação A/A^* (GLASS, et al.^[3]).

Após a saída do jato, a pressão do ambiente do BOF tem influência sobre o comportamento do jato. O objetivo desse trabalho é estudar com comportamento do jato em pressão variando em torno da pressão atmosférica no interior de convertedores BOF.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para esse estudo foi considerada um pressão absoluta fixa no reservatório estagnante de $9,83 \times 10^5 \text{ Pa}$ assim como dimensões fixas para o bocal. A pressão ambiente foi alterada conforme a Tabela I.

Tabela I – Pressões no ambiente do BOF.

P_{SAIDA} / P_O (#)	Condição
$P_{SAIDA} / P_O = 0,1104$	Ambiente
$P_{SAIDA} / P_O > 0,1104$	BOF com alta pressão interna
$P_{SAIDA} / P_O < 0,1104$	BOF com baixa pressão interna

O número de Mach sofre influência da condição ambiente no interior do convertedor denotado através da equação (FERRI, ^[4]):

$$Ma = \sqrt{\frac{2}{(\gamma - 1)} \times \left[\left(\frac{1}{\left(\frac{P_{BOF}}{P_o} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right) - 1 \right]} \quad (2)$$

Onde: “P_{BOF}” - Pressão no interior do BOF (Pa); “P_o” - Pressão no reservatório estagnante (Pa); “γ” - Constante adiabática dos gases.

Nessa equação, para uma pressão fixa no reservatório estagnante e variando a pressão no interior do forno, é possível notar que em ambientes em baixa pressão ou tendendo ao vácuo a razão entre pressões tende à zero, por sua vez, estando no denominador da equação, há um aumento no número de Ma. Por outro lado para fornos pressurizados, com a razão entre as pressões tendendo a unidade, ou seja a pressão da atmosfera do forno aproximando-se da pressão do reservatório estagnante, não ocorre a transformação do fluxo e o número de Mach tende a zero. Para o cálculo dos valores teóricos de penetração no banho, foram correlacionados a quantidade de movimento do jato através de um balanço de energia na base da cavidade e o número modificado de Froude, conforme a adequação das equações desenvolvidas por Szekely, *et al*^[5], Meidani, *et al*^[6] e Alam *et al*^[7,8,9], e proposta por Maia^[10] e apresentada na Figure 3.

$$\frac{\pi \times \rho_{GAS} \times V_{EXIT}^2 \times D_{EXIT}^2 \times \cos \theta \times n}{4 \times \rho_{LIQUID} \times g \times H^3} = \frac{\pi}{2 \times K^2} \times \frac{P}{H} \left(1 + \frac{P}{H \times \cos \theta} \right)^2 \quad (3)$$

Onde “ρ_{GAS}” – densidade na saída do bocal (kg.m⁻³), “ρ_{LIQUID}” – densidade do banho (kg.m⁻³), “g” – aceleração da gravidade (m.s⁻²), “P” – Penetração (m), “H” – distância da saída do bocal ao banho(m), “K” - uma constante empírica para cada tipo de bico, “θ” - ângulo de cada um dos furos dos bicos com a vertical, “n” - número de furos do bico.

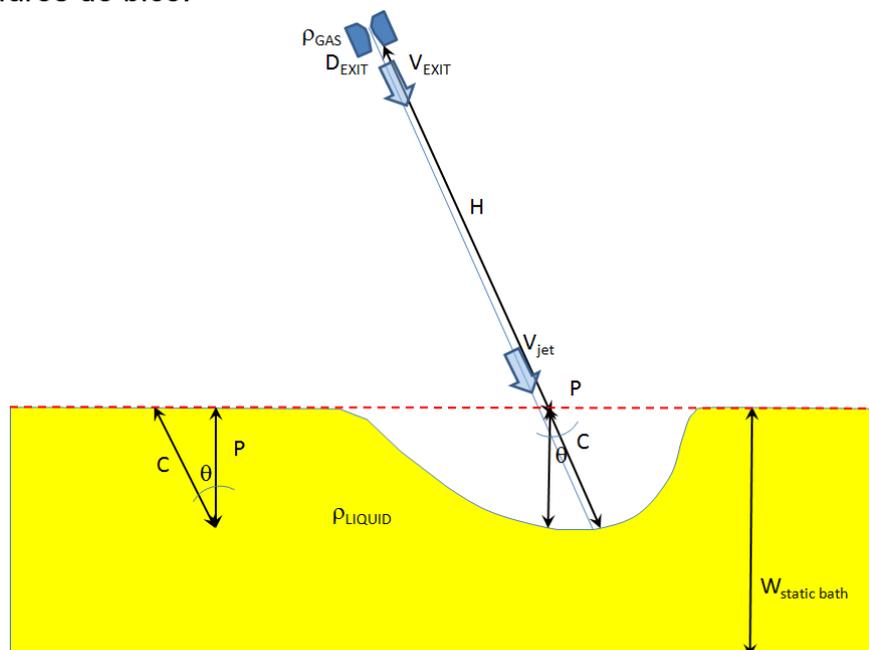


Figure 3 - Desenho esquemático da penetração do jato de gás.

Considerando que cada bocal forma uma cavidade cujo raio corresponde à penetração, foram então calculados o volume e, em seguida, a massa deslocados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figure 4 é apresentado um gráfico do comportamento da penetração de jato para varias condições de pressões no interior do convertedor.

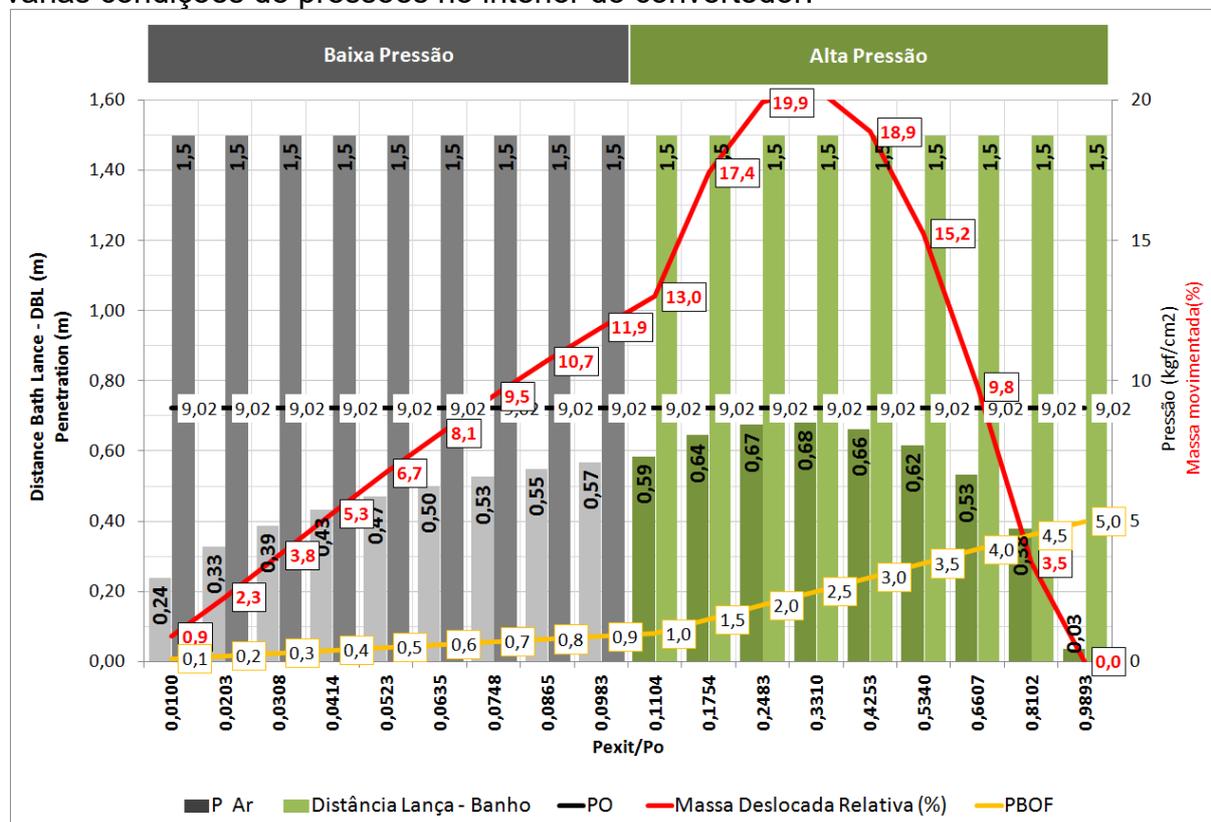


Figure 4 – Razão de pressão x penetração de jato e massa movimentada.

É possível notar que o valor de DBL (Distância Lança Banho) está fixo em 1,5 metros. Também é possível notar que a pressão no reservatório estagnante está fixa em $9,83 \times 10^5$ Pa. A massa movimentada, resultado do cálculo da penetração, sofre variação conforme a pressão no interior do forno é alterada, atingindo o máximo quando existe um aumento de pressão de $2,41 \times 10^5$ Pa acima da pressão atmosférica.

A Figure 5 apresenta o efeito da variação da pressão no interior do convertedor sobre a vazão do jato e sobre a massa movimentada, considerando uma pressão no reservatório estagnante fixa.

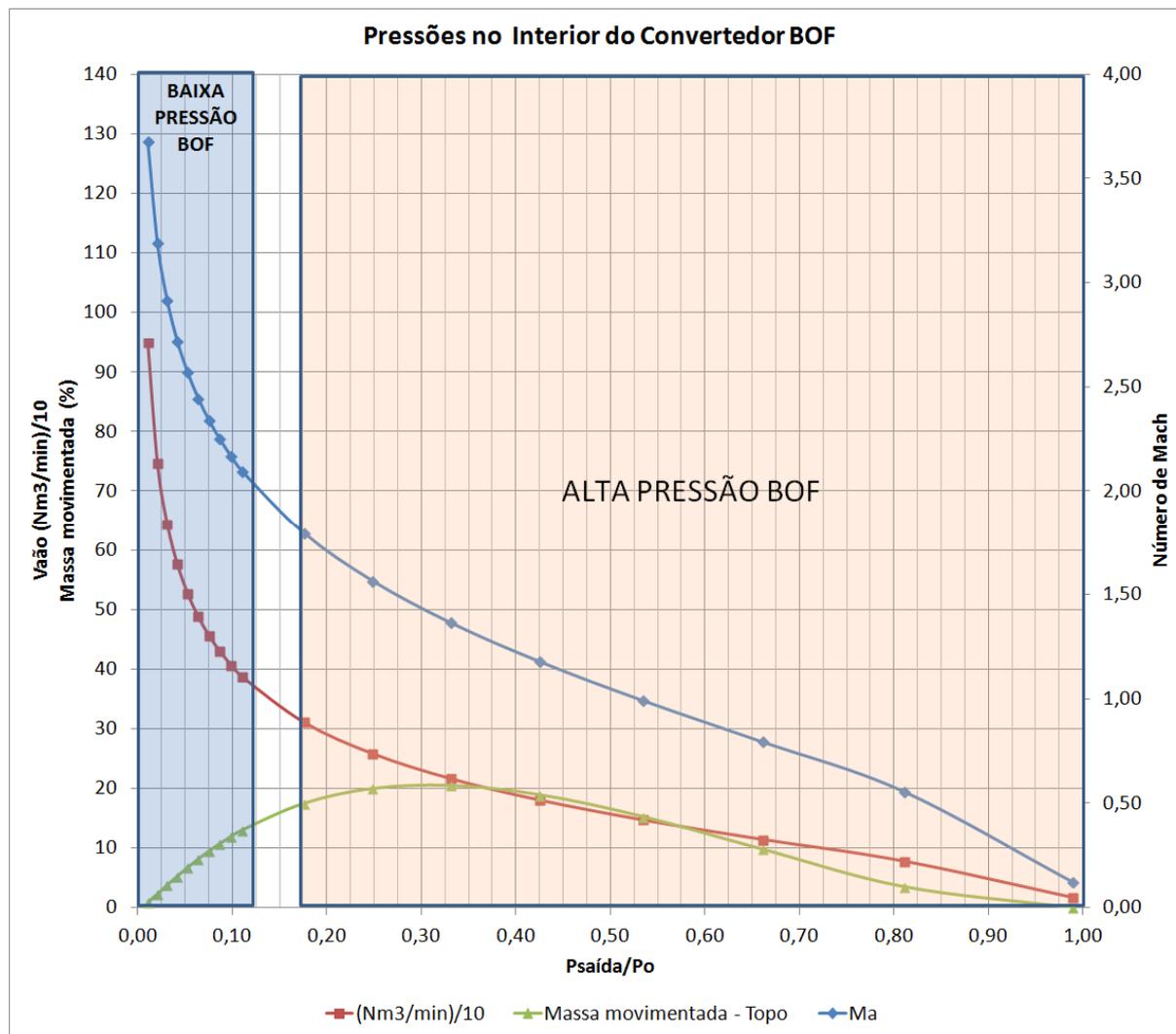


Figure 5- Comportamento do Jato de Oxigênio x Pressões internas no BOF.

O número de Mach, conforme visto na equação 1, é afetado pela relação entre a pressão do reservatório estagnante e a pressão no interior do forno. Assim quanto menor for essa razão, ou seja, maior a diferença de pressão entre esses dois ambientes distintos, maior será o aumento do número de Mach. Isso pode ser interpretado como um comportamento de jato subexpandido, gerando um aumento na expansão volumétrica que provocará o aumento da vazão de saída do gás. Porém esse comportamento afeta negativamente a taxa de transferência de massa do gás injetado sobre o banho líquido que está a uma determinada distância, implicando em uma baixa penetração no banho.

No outro extremo, quando a pressão do forno está próxima da pressão do reservatório estagnante, o fluxo de gás sofre resistência na saída, tendendo o número de Mach a zero. Esse comportamento é similar ao de jato sobre superexpandido. Essa resistência imposta pela pressão do forno é a responsável pela baixa transferência de massa que irá atingir a superfície do banho, reduzindo a massa movimentada.

A massa movimentada, ou seja, o volume de material do banho líquido que é deslocado pelo jato, tem comportamento de uma parábola sendo o ponto de máximo com o convertedor trabalhando com pressões superiores à pressão ambiente. O ponto de máximo da curva corresponde a um aumento na pressão relativa do

ambiente do convertedor em torno de $1,96 \times 10^5 \text{Pa}$. Após esse valor a massa movimentada volta a decrescer.

A Figure 5 mostra aspectos divergentes para o dimensionamento de um bocal supersônico. Com a premissa de um dimensionamento para um aumento de vida útil do bocal, a tendência é buscar dimensionamento que objetive comportamentos subexpandidos para evitar potenciais pós-combustões ao redor do bocal e iniciar mecanismo de desgaste provocado por fusões localizadas devido às altas temperaturas e mesmo processos de recristalização do material. Por outro lado, para maximizar a transferência de massa do jato para o banho líquido nos convertedores, pressões superiores à ambiente e em torno de $1,96 \times 10^5 \text{Pa}$ são ideais, atingindo o ponto de inflexão da parábola, mas essa condição também é favorável à condição de jato sobre-expandido, responsável por efeitos deletérios ao redor do bocal.

Foi realizada uma análise da influência da temperatura do oxigênio no interior do reservatório estagnante, conforme apresentado na Figure 6.

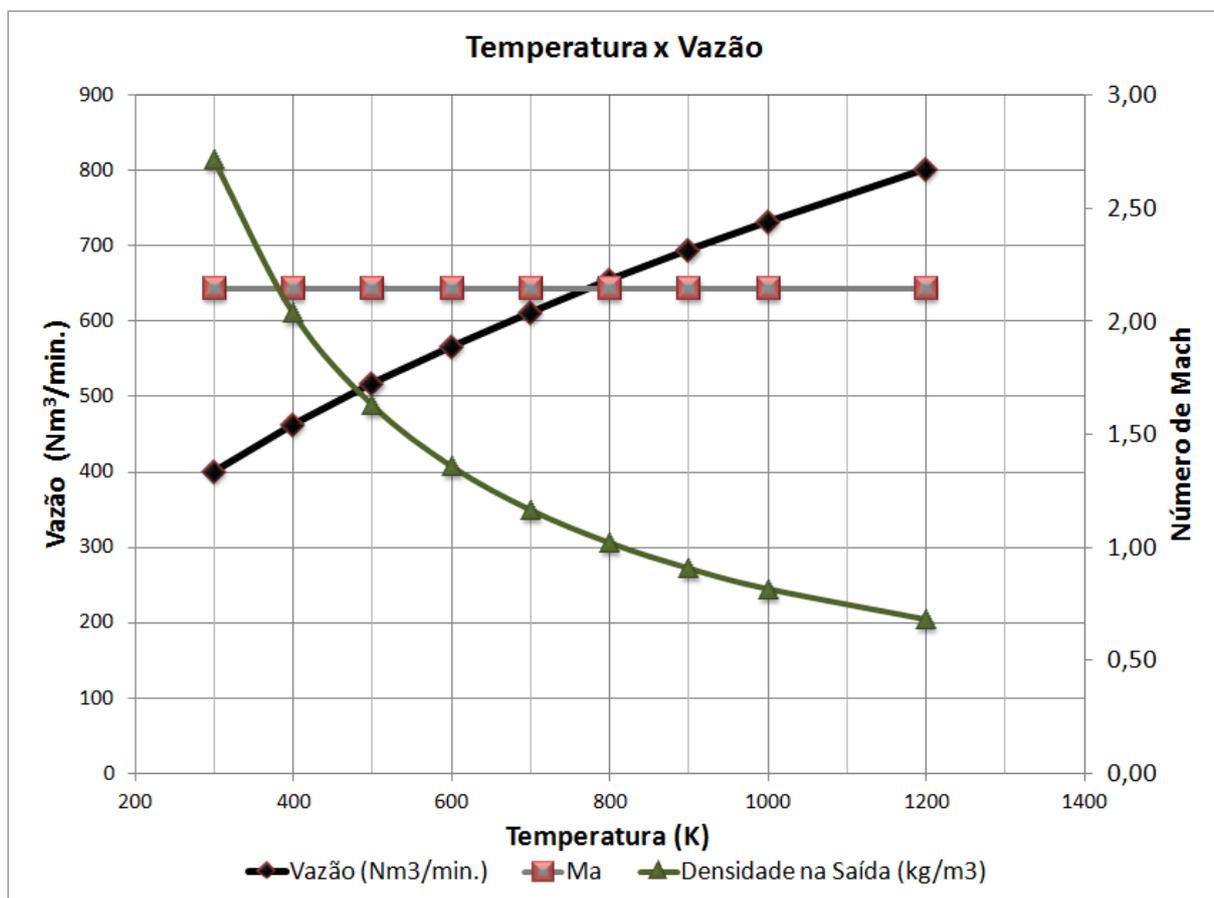


Figure 6 - Temperatura do oxigênio x comportamento da vazão e densidade do gás.

A Figure 6 reforça que o número de Mach é apenas dependente das pressões do reservatório estagnante e da pressão ambiente do forno. Nesse caso foi utilizada uma pressão de $1,013 \times 10^5 \text{Pa}$, ou seja, a pressão atmosférica. Entretanto, a variação de temperatura do gás afeta o valor da velocidade do som no meio, bem como a densidade do gás na saída do bocal. Assim, quanto maior a temperatura do gás, maior será a velocidade na saída do bocal e, portanto maior vazão considerando fixos os diâmetros da garganta e saída do bocal. Mas à medida que a velocidade na saída do bocal cresce, cresce também a velocidade do som no meio, devido a

influência da temperatura na redução da densidade do gás, conforme mostrado nas equações (5) e (6):

$$v_{SOUND} = \left(\gamma \times \frac{R \times T_{EXIT}}{\left(\rho_{GAS} / 1000 \right)} \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$\rho_{GAS} = \frac{\left(\frac{P_o}{P_{ATM}} \right) \times PM_{GAS}}{R \times T_o} \quad (6)$$

Onde “ ρ_{GAS} ” – densidade na saída do bocal (kg.m^{-3}), “ ρ_{LIQUID} ” – densidade do banho (kg.m^{-3}), “g” – aceleração da gravidade (m.s^{-2}), “P” – Penetração (m), “H” – Distância da lança ao banho ou DBL (m), “K” - uma constante empírica para cada tipo de bico, “ θ ” - ângulo de cada um dos furos dos bicos com a vertical, “n” - número de furos do bico.

Assim a taxa de transferência de massa será mantida constante devido à relação inversamente proporcional entre velocidade crescente, densidade decrescente provocado pelo aumento da temperatura do gás. Dessa forma, para uma mesma distância da lança ao banho (DBL), a penetração do jato e massa movimentada será constante, conforme apresentado na Figure 7.

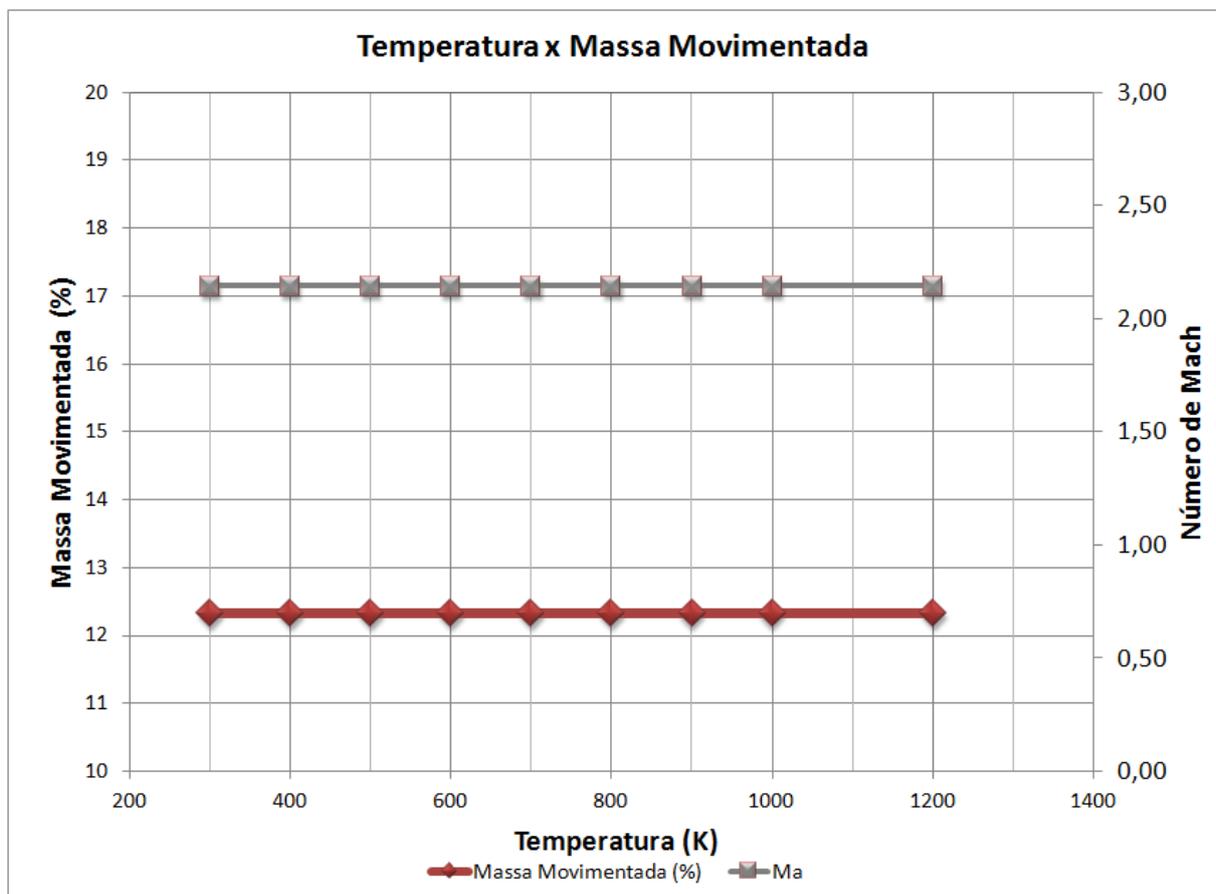


Figure 7 - Efeito da temperatura sobre o número de Mach e massa movimentada.

A Figure 8 apresenta um gráfico semelhante ao da Figure 5, porém nesse caso os cálculos foram desenvolvidos com uma temperatura do oxigênio de 498K.

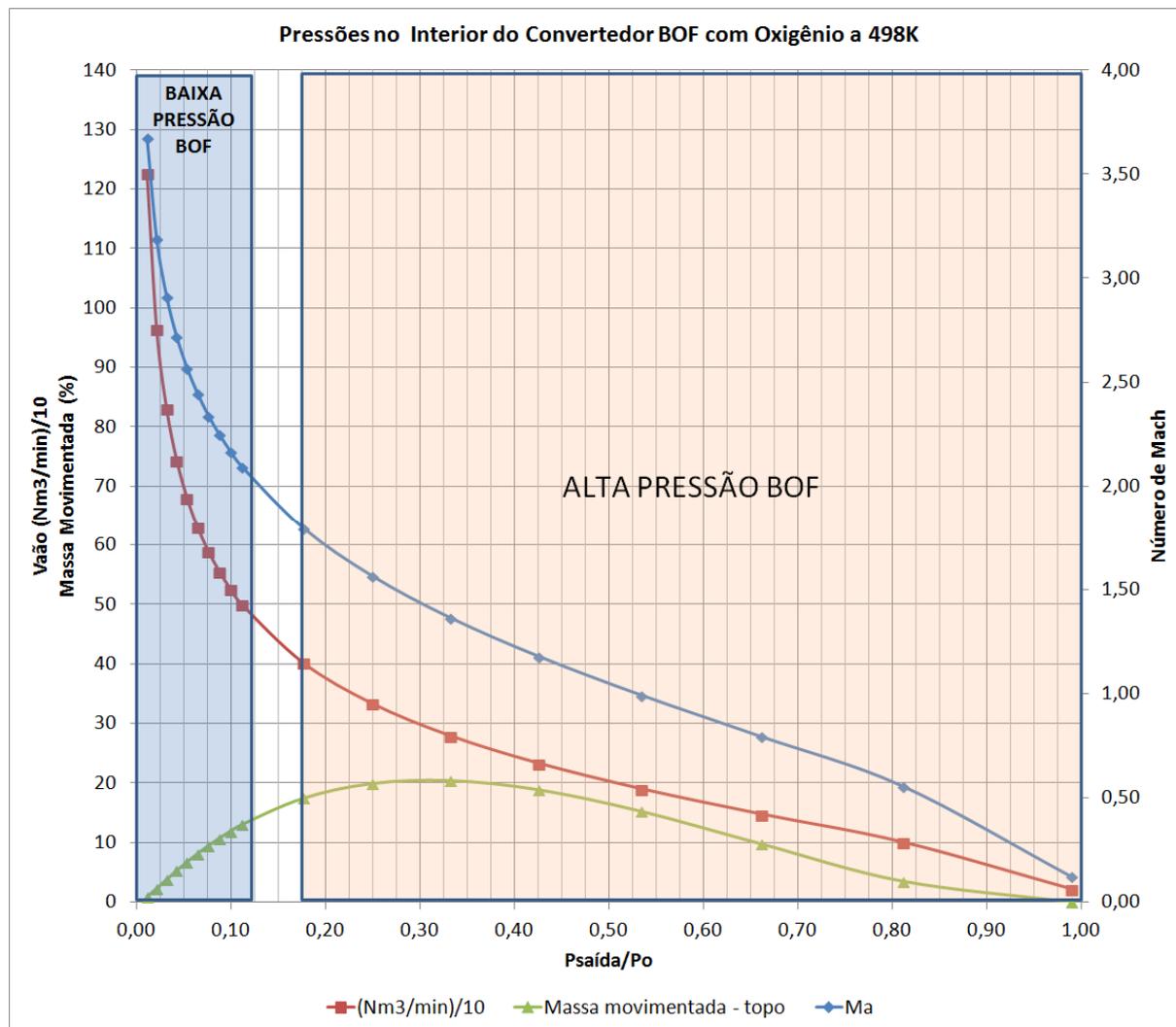


Figure 8- Comportamento do Jato de Oxigênio a 498K x Pressões internas no BOF.

A comparação entre as Figure 5 e 8 permite notar que o comportamento do número de Mach e da massa movimentada pelo sopro não sofreram alterações no seu comportamento em função do trabalho com gás em elevada temperatura ainda no interior do reservatório estagnante. Mas, em função da temperatura, houve aumento da vazão na saída do bocal.

4 CONCLUSÃO

As principais conclusões do trabalho são:

1. A pressão no interior do BOF afeta o comportamento do jato de oxigênio;
2. Existe uma pressão no interior do BOF ótima para maximizar a penetração do jato;
 - a. BOF com baixa pressão tende a aumentar valores de Mach e vazão. O Jato tem comportamento subexpandido reduzindo a penetração no banho líquido;
 - b. BOF com elevada pressão tende a reduzir os valores de Mach e vazão devido à resistência criada;
 - c. A pressão de BOF ideal é superior à atmosférica;
3. A velocidade Mach não é afetada pela temperatura do oxigênio;
4. A massa movimentada não é afetada pela temperatura do oxigênio;

Agradecimentos

Os autores agradecem a Lumar Metals e a UFMG .

REFERÊNCIAS

1. SHAPIRO, H. N., MORAM, M. J., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. Ed. New York: John Wiley & Sons, 1988. P.417-435.
2. L. M. NASCIMENTO, "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).
3. 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.
4. A. FERRI, "Elements of Aerodynamics of Supersonic Flows," *The MacMillian Company* New York:,1949.
5. SZEKELY, J., THEMELIS, N. J., *Rate Phenomena in Process Metallurgy*. 1 ed. Montreal: John Wiley & Sons, 1971. 784p.
6. MEIDANI, A. R. N., ISAC M., RICHARDSON, A., CAMERON, A., GUTHRIE, R. I. L., *Modelling Shrouded Supersonic Jets in Metallurgical Reactor Vessels, ISIJ Internacional*, v.44, n.10, p.1639, out. 2004.
7. ALAM, M., IRONS, G., BROOKS, G., FONTANA, A., NASER, J., *Inclined Jetting and Splashing in Electric Arc Furnace Steelmaking*. ISIJ Internacional, 2011, v.51, n.9, p. 1439-1447.
8. 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.
9. ALAM, M., NASER, J., BROOKS, G., FONTANA, A. *Computational Fluid Dynamics Simulation of Supersonic Oxygen Jet Behavior at Steelmaking Temperature* Metallurgical and Materials Transactions B, volume 41B, p.636-645. Jun. 2010.
10. MAIA, B. T., *Modelamento Físico e Matemático do Escoamento de Fluidos nos processos BOF e EOF*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2013. 238p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica).