



ESTUDO DO EFEITO DA PRESSÃO E DA GEOMETRIA DE BOCAL DE LANÇA NO COMPORTAMENTO SUPERSÔNICO DO OXIGÊNIO ATRAVÉS DE ANÁLISE POR CFD¹

Breno Totti Maia²
José Eduardo Mautone Barros³
Leandro Miranda Nascimento⁴
Marcelo de Souza Lima Guerra⁵
Roberto Parreiras Tavares⁶

Resumo

Neste trabalho foi desenvolvida uma análise do comportamento de bocais de lança supersônica via CFD e foram propostas alterações visando melhorar o seu desempenho. A metodologia envolve o uso de CFD para simular os campos de velocidade, pressão, densidade e temperatura do oxigênio. Foi avaliado o comportamento do oxigênio ao longo do bocal, desde a região de elevada pressão e baixa velocidade na entrada até a condição supersônica na saída. Os valores obtidos foram comparados com resultados analíticos para condições ideais e foram propostas alterações na geometria para reduzir prováveis perdas de carga. Em seguida foi avaliado o comportamento do jato e sua interação com o ambiente. Propostas de novas geometrias foram analisadas com o objetivo de maximizar a velocidade do jato.

Palavras-chave: Supersônico; Fluidodinâmica computacional; Pressão; Gás compressível.

STUDY OF NET PRESSURE EFFECTS AND LANCE TIPS GEOMETRY IN THE BEHAVIOR OF THE SUPERSONIC OXYGEN BY CFD ANALYSES

Abstract

In the present work, the behavior of supersonic nozzles lance was analyzed by CFD and design changes were proposed to improve performance. The methodology involved the use of CFD in the design of the tip nozzle. The behavior of oxygen jet along the nozzle was analyzed, since the region of high pressure and low speed until the entrance to the supersonic condition at the output. The values obtained were compared to analytical results for ideal conditions and geometry changes were proposed to reduce losses. The behavior of the jet and its interaction with the environment were also investigated. The new geometries proposed were analyzed in order to maximize the jet speed.

Key words: Supersonic; CFD; Pressure; Compressible gas

¹ Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista e Pesquisador da Lumar Metals, sócio da ABM,

³ Professor PhD. do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG,

⁴ Aluno de Graduação da UFMG,

⁵ Engenheiro Mecânico e Pesquisador da Lumar Metals, sócio da ABM,

⁶ Professor PhD. do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG.



1 INTRODUÇÃO

Convertedores BOF tem como objetivo principal a remoção de carbono do ferro-gusa para a sua transformação em aço. Esse processo se dá a partir da reação do carbono dissolvido no ferro gusa com o oxigênio, formando $\text{CO}_{(g)}$ e $\text{CO}_{2(g)}$ e diminuindo a concentração de carbono no banho metálico.

Para tal, são empregadas atualmente lanças para sopro de oxigênio atingindo velocidades supersônicas, alcançadas devido às elevadas pressões no reservatório e por um correto dimensionamento do bocal, contribuindo para a penetração do oxigênio no banho metálico de alta densidade.

Atualmente, softwares de fluidodinâmica computacional (CFD), através de técnicas de elementos ou volumes finitos, conseguem obter, não apenas as médias das grandezas, como as equações de Glass e Smith⁽¹⁾, mas também valores pontuais no domínio analisado de soluções. Neste trabalho foi, então, desenvolvida uma análise do comportamento de bocais de lança supersônica via CFD e foram propostas alterações visando melhorar o seu desempenho.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo utilizar o software ANSYS CFX para estudar o comportamento do jato de oxigênio no bocal da lança e estabelecer uma comparação com modelo teórico analítico aplicado a bocais usados rotineiramente em convertedores LD. Esse trabalho visa também aplicar simulações via ANSYS CFX para comparar o desempenho dos mesmos quanto à turbulência e perturbações interna aos bocais e a interação do jato com a atmosfera, propondo novas geometrias para o bocal.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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. Para simplificar os cálculos desenvolvidos, o oxigênio será considerado como gás ideal. A equação de conservação de energia permite estabelecer 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.

Uma primeira simplificação da equação de Bernoulli para descrever o comportamento de jatos sônicos consiste em considerar um tubo na horizontal, assumir 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 equações.

Shapiro e Moran⁽²⁾ 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.

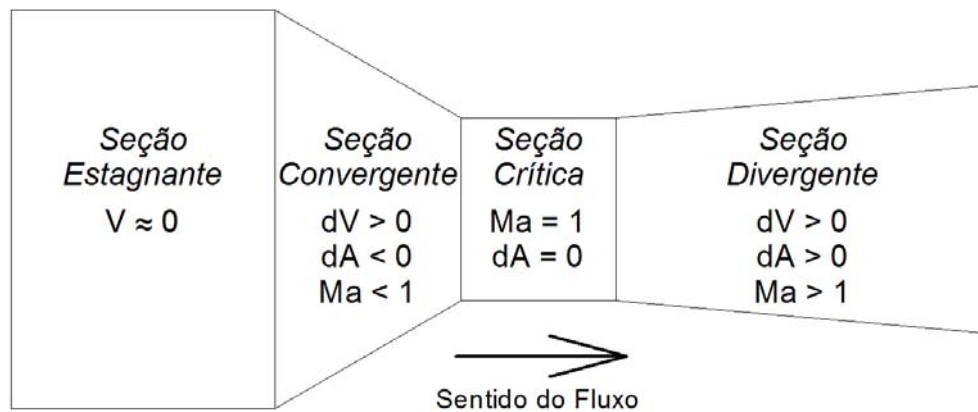


Considerando a variação na seção transversal do duto, e combinando com as relações previamente estabelecidas obtêm-se:

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

onde “Ma” – número adimensional de Mach, “A” – Área e “v” = Velocidade.

O número adimensional de Mach representa uma relação entre a velocidade do fluido e a velocidade do som no meio. A Figura 1 apresenta a evolução da velocidade de subsônica a supersônica em relação à área.



Fonte: Nascimento⁽³⁾

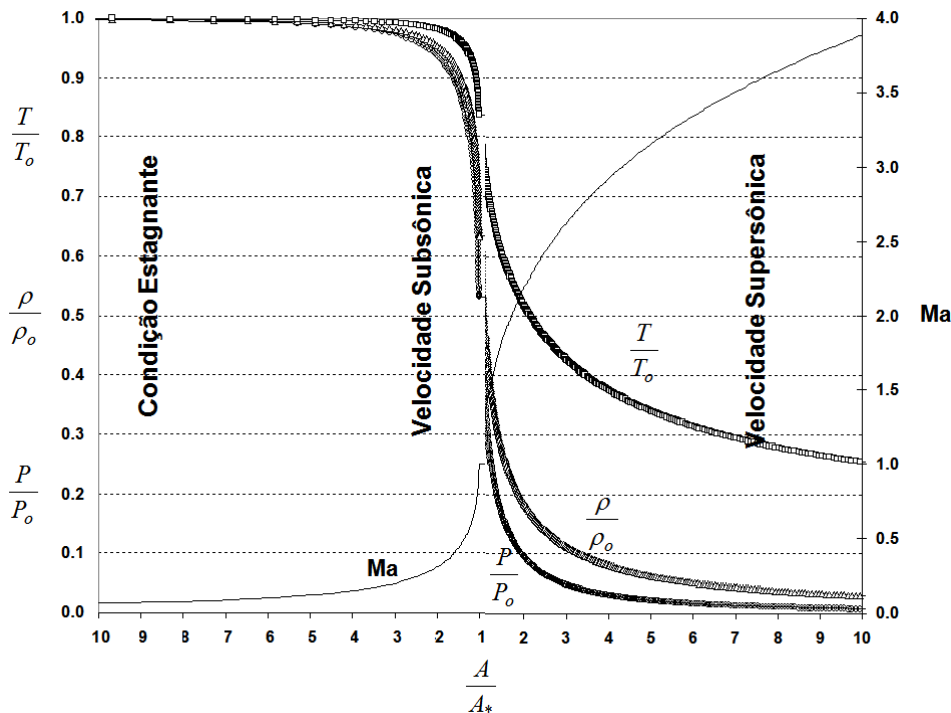
Figura 1 - Entrada e saída de um bocal supersônico.

As variações das propriedades do gás podem ser expressas na forma gráfica em função do número de Mach, conforme visto na Figura 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 fornecendo 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^* está próxima da unidade, onde as características do fluxo são alteradas rapidamente com pequenas alterações na seção. As redondezas 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 do bocal.



Fonte: Glass e Smith⁽¹⁾

Figura 2 - Variação das propriedades do fluxo com a variação A/A^* .

Para obter informações das propriedades em uma determinada seção faz-se uso de modelos matemáticos. O CFD consiste em uma ferramenta computacional que resolve sistemas de equações a partir de condições de contorno do problema através da discretização do domínio em pequenos elementos de volume. Balanços de massa, movimento e calor são resolvidos para cada elemento. Os erros no fechamento dos balanços são conhecidos como resíduo. Este resíduo deve ser minimizado durante a execução da simulação.

Um recurso desta ferramenta, os modelos de turbulência, busca descrever escoamento de um fluido em regime turbulento contornando o problema das elevadas flutuações de velocidade.

4 MATERIAL E MÉTODOS

No desenvolvimento do trabalho foi utilizado o *software* comercial ANSYS CFX-12 para simulação numérica. As etapas de execução 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*.

Foram realizadas dois grupos de simulações, o primeiro foi considerado somente o Bocal para avaliar o aparecimento de ondas de choque em função da parede, representado na Figura 3 pela região A. Já o segundo grupo de simulações foi ampliado o domínio, incluindo a região B mostrada na Figura 3, que corresponde à expansão do jato supersônico para o meio. Desta forma pode-se avaliar os efeitos da parede, e o comportamento do jato em função da geometria do bocal.

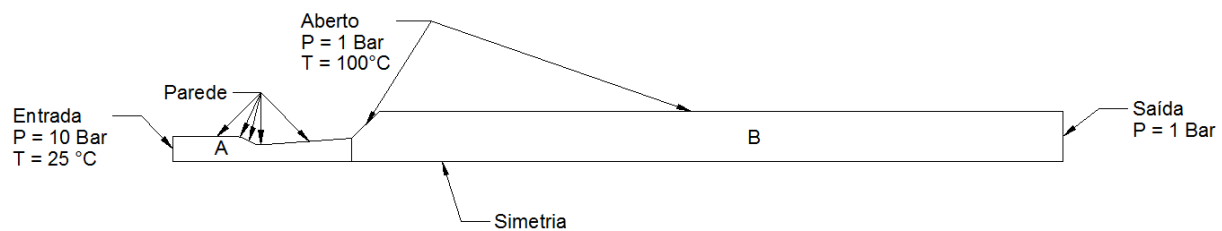


Figura 3 - Condições de Contorno utilizadas nas simulações.

O modelo de turbulência utilizado foi o SST (*Shear Stress Transport Model*) que utiliza o modelo " $\kappa-\omega$ " de turbulência e frequência para regiões de parede e " $\kappa-\varepsilon$ " para centro do fluxo⁽⁴⁾. Esta combinação de funções garante uma transição suave entre os dois modelos e regime de deslocamento do fluido. Em comparação com o tradicional modelo de turbulência " $\kappa-\varepsilon$ ". O modelo SST apresentou vantagens relativas ao tempo de simulação, pois a convergência era atingida em média com 350 iterações ao passo que o modelo " $\kappa-\varepsilon$ " necessitava de em torno de 1200 iterações.

As geometrias de bocais são apresentadas na Figura 4 em função do diâmetro crítico.

Em todos os casos, o diâmetro de entrada, crítico e o diâmetro de saída permanecem os mesmos assim como o comprimento total, alterando-se apenas o perfil do bocal.

Para comparação entre o resultado analítico e a simulação numérica foi utilizado o bocal com trecho reto alongado, e pressões de 10 bar, 12 bar, 14 bar e 16 bar. Para simulação da influência da geometria foi utilizada a pressão de 10bar em todos os casos.

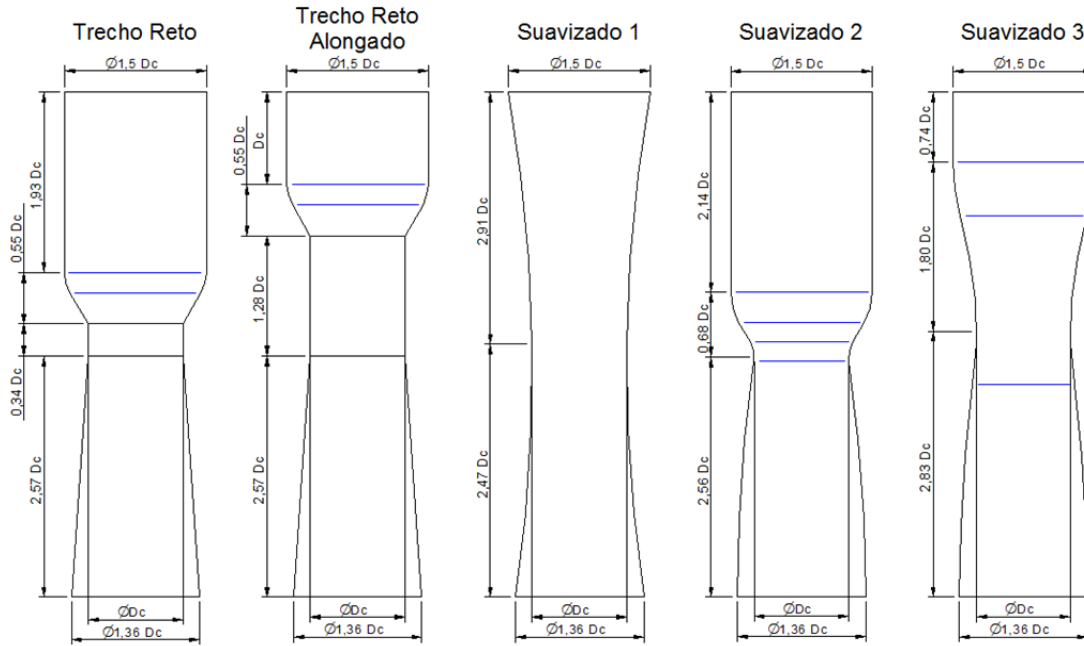


Figura 4 - Geometria dos bocais simulados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira simulação foi considerada uma pressão de 10 bar e os parâmetros de um bocal tradicional da indústria siderúrgica com a presença do Trecho Reto Alongado na região da garganta, apresentada na Figura 5.

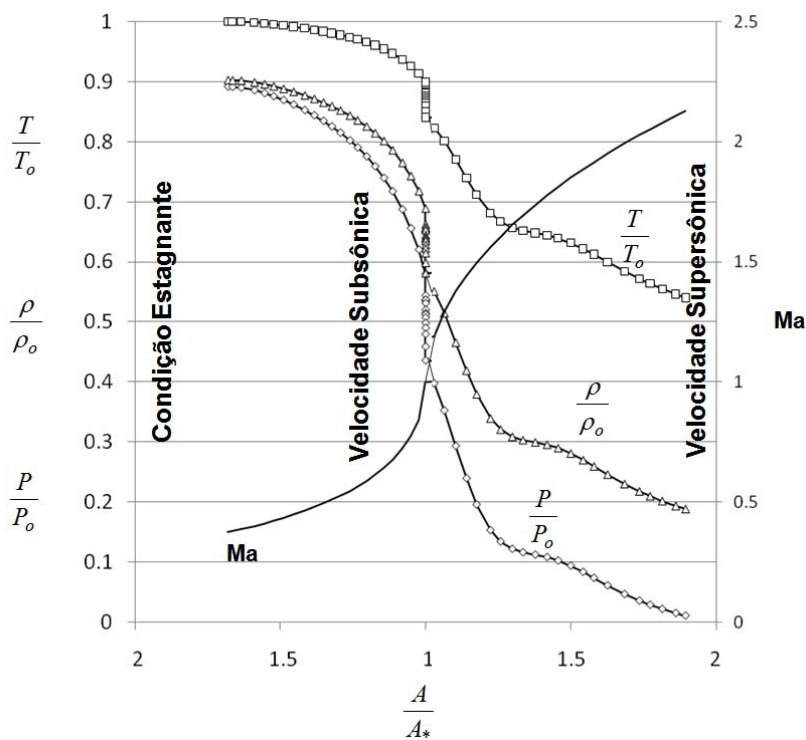


Figura 5 - Variação das propriedades do fluxo com a variação A/A^* para o Bocal com Trecho Reto.

Comparando as Figura 2 e Figura 5 é possível notar uma perturbação no comportamento da pressão, densidade e temperatura. Esta perturbação na região



transônica está associada à presença do trecho reto. Como em todo comprimento do trecho reto a relação de área é igual à unidade, as variações de propriedades não são claras. Entretanto através da simulação numérica foi possível constatar o comportamento da velocidade conforme apresentado na Figura 6.

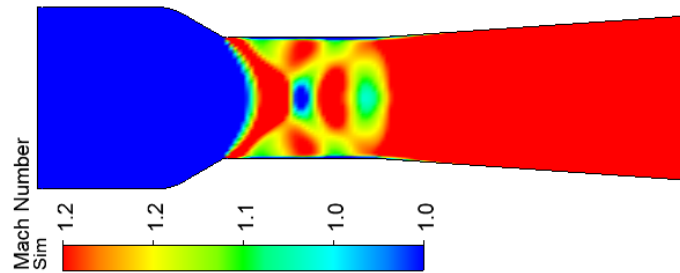


Figura 6 - Avaliação do perfil de velocidade para o Bocal com Trecho Reto.

Na Figura 6 a escala foi restrita na região da velocidade sônica, ou $Ma=1$. É possível notar que existem expansões de ondas limitadas pelo trecho reto, gerando regiões de baixa velocidade dentro do comportamento sônico. Portanto, o trecho reto não respeita a correta relação de área, perturbando a transição das propriedades do oxigênio quando comparado com a curva ideal. Ainda foram realizadas simulações em várias pressões em comparação com o valor teórico, apresentado na Figura 7.

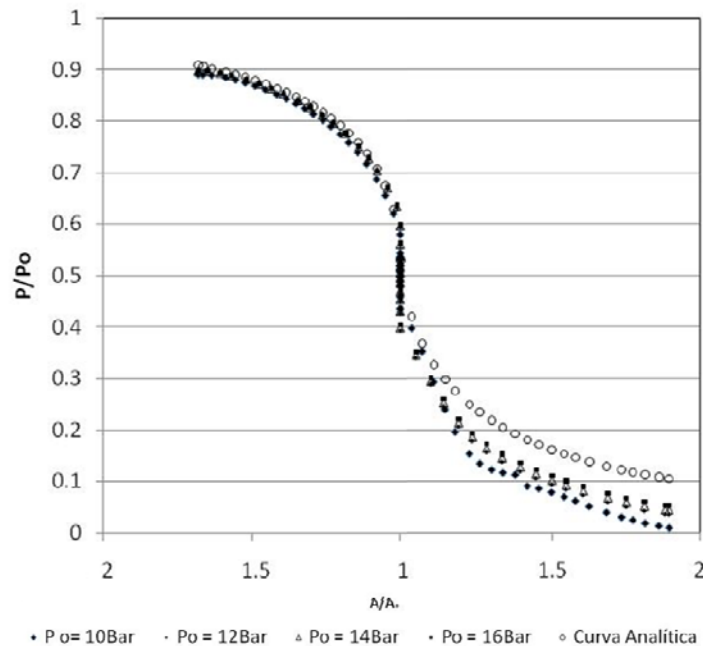


Figura 7 - Influência do trecho do Bocal 1 em várias pressões.

Na Figura 7 nota-se que o aumento da pressão estagnante, aproxima os valores de pressão no trecho divergente ($A/A^*>1$) dos valores da curva ideal, porém a existência do trecho reto gera perdas de pressão significativas.

A partir da análise da pressão, foram realizadas simulações reduzindo o comprimento do trecho do reto a um pequeno elemento de área. O comprimento da seção divergente foi aumentado para manter o comprimento total do bocal. O resultado desta simulação é apresentado na Figura 8 para o bocal suavizado 1.

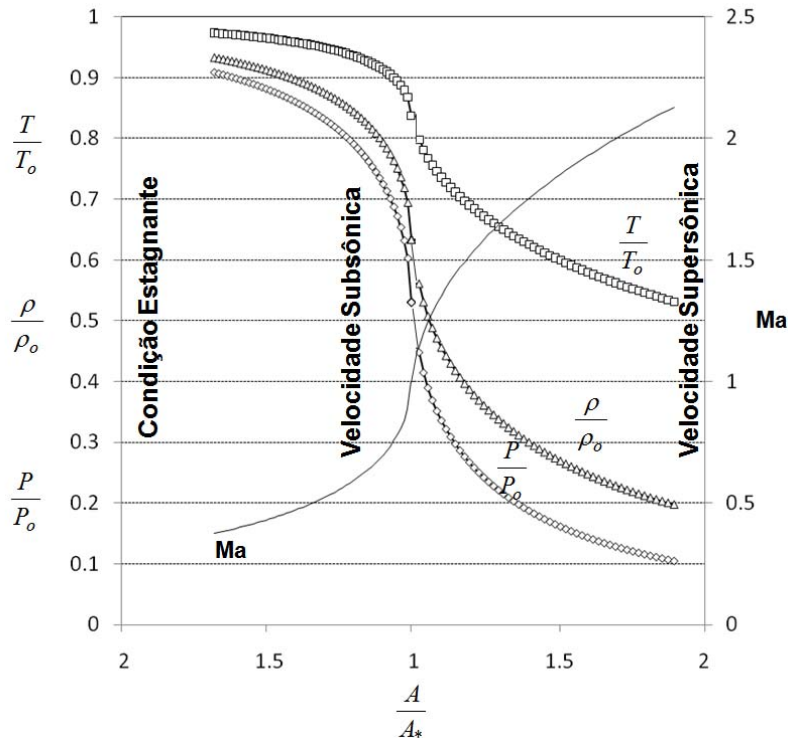


Figura 8 - Variação das propriedades do fluxo com a variação A/A^* para o Bocal 2.

Os resultados da Figura 8 são próximos da curva analítica, com pequenas diferenças de valores. Em comparação com a Figura 2, os resultados permitem concluir que o trecho reto provoca uma restrição a passagem do gás e queda de eficiência na transição das propriedades. Mesmo que a velocidade Mach seja a mesma, pois é determinado pela pressão do reservatório e diâmetro crítico, o trecho reto provoca uma queda na pressão de saída. A queda na pressão de saída afeta a penetração do jato no banho líquido, potencialmente reduzindo a taxa de descarburização e a eficiência do oxigênio, significando no processo produtivo aumento de tempo de sopro e no consumo de oxigênio.

A razão associada para existência do trecho reto em grande parte dos bocais de lanças utilizados na siderúrgica mundial é o processo de fabricação dos bocais, porém os modernos equipamentos CNC (Controle Numérico Computadorizado) permitem a usinagem de geometrias complexas como parabolóides, hiperbolóides e outros, com rigor e precisão dimensional.

Através da simulação foi realizado um estudo comparativo com novas propostas de geometria, bocal suavizado 2 e bocal suavizado 3 da Figura 4 e apresentados na Figura 9 considerando o modelo SST de turbulência.

Na Figura 9, o bocal suavizado 2 e 3 apresentou uma zona do transônico bem definida, assim como a formação clara das ondas de expansão do fluido.

Segundo Ferri⁽⁵⁾, para o correto desenho de um bocal o método das características deve ser usado para uma condição uniforme de distribuição de velocidade na saída evitando a formação de ondas compressão ou expansão. As propostas dos bocais suavizados foram feitas de forma empírica, pois o método das características ainda está em estudo pelos autores. Os resultados do modelo de turbulência SST para todas as geometrias simuladas são apresentados na Figura 10.

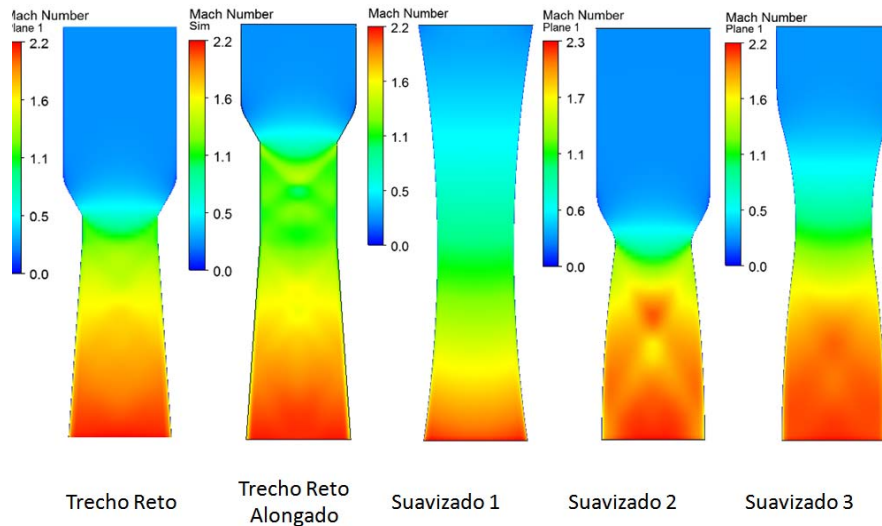


Figura 9 - Simulação do modelo de turbulência SST das geometrias propostas: a) Bocal 1 com trecho reto, b) Bocal com trecho reto alongado, c) Bocal suavizado 1, d) Bocal suavizado 2 e e) Bocal suavizado 3.

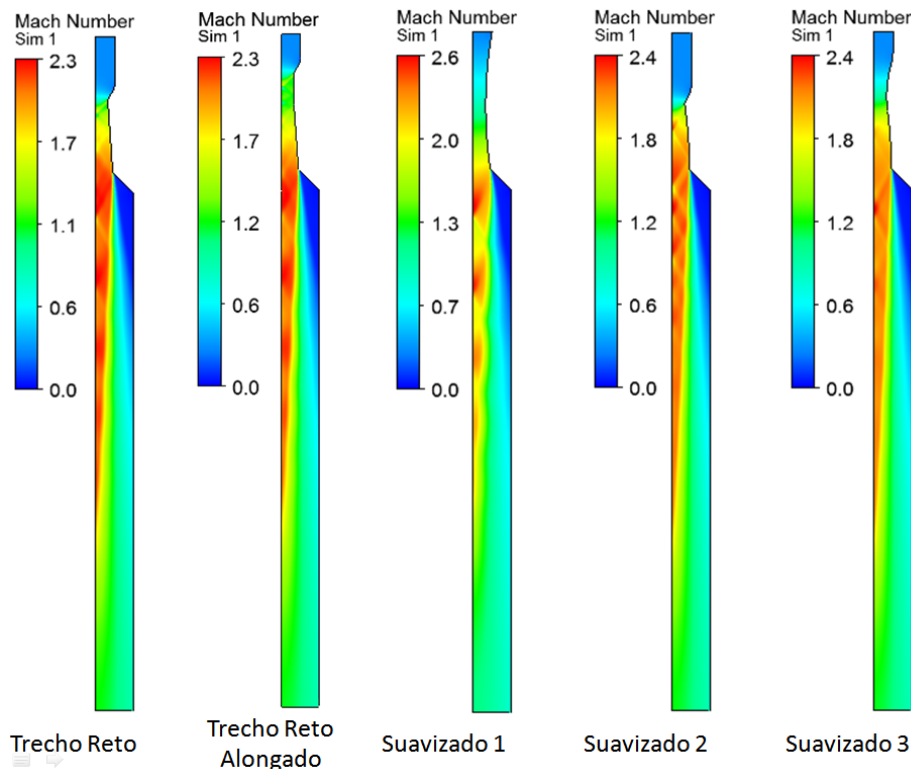


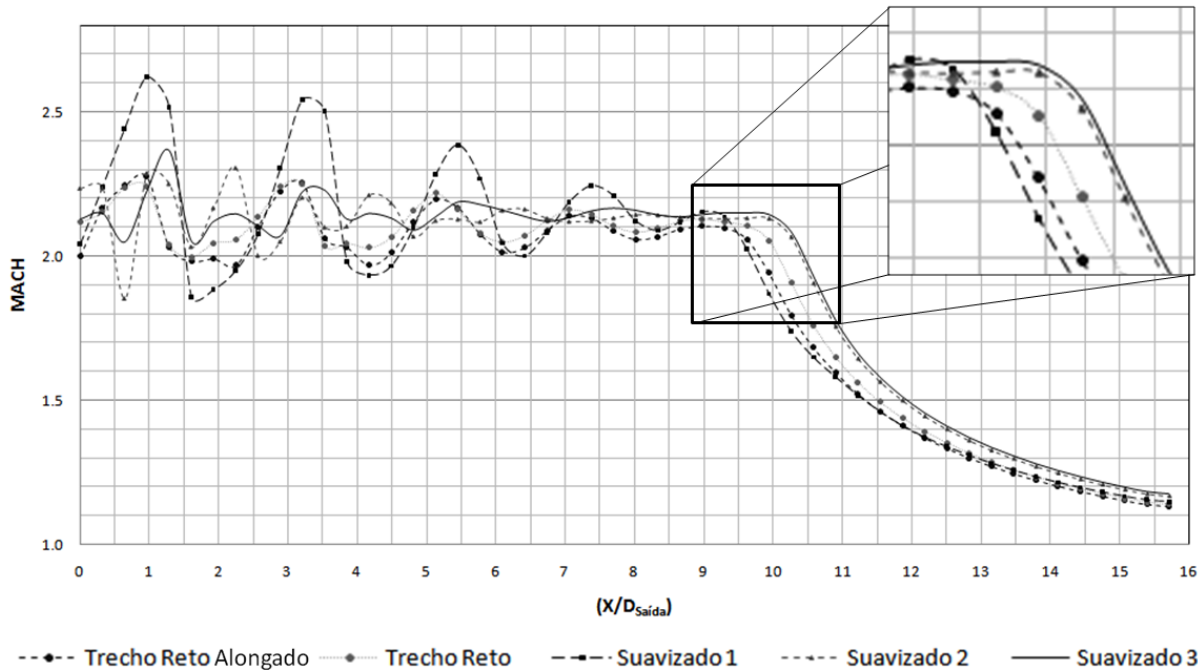
Figura 10 - Comparação do núcleo supersônico para as geometrias de bocais testadas.

Os resultados apresentados na Figura 10 mostram a ocorrência expansões supersônicas nos jatos nas saídas dos bocais. O comportamento ideal seria o estado de completamente expandido sem a formação de ondas de expansão. Faz parte da estrutura de jatos supersônicos zonas de expansão e compressão, sendo o objetivo de um correto dimensionamento do bocal minimiza-las. A geometria que melhor atendeu a este proposito foi o bocal suavizado 3, atingindo o maior comprimento do núcleo potencial. Este comprimento é definido como sendo a região ao qual a velocidade no eixo do jato é superior a Mach=2. Na Figura 10, notadamente no bocal suavizado 1, também é possível verificar a influência da



geometria, nas ondas de expansão e as bruscas variações nas propriedades do jato e a interferência da atmosfera no comportamento do jato, em razão do ângulo de saída ser calculado por uma função parabólica.

Para uma correta análise dos resultados, foi gerado um gráfico com os valores do Numero de Mach na linha de centro do bocal em relação à distancia da saída. Através destas medidas é possível quantificar com precisão o comprimento do núcleo supersônico e avaliar entre as geometrias propostas o melhor resultado para o processo siderúrgico, apresentado na Figura 11.



--- Trecho Reto Alongado ● Trecho Reto - - - Suavizado 1 - - - Suavizado 2 — Suavizado 3
Figura 11 - Determinação do comprimento do Núcleo Potencial ao longo do eixo do jato para as geometrias de bocais testadas.

Na Figura 11 nota-se que o comprimento do núcleo potencial está em torno de 10 vezes do diâmetro de saída, observando-se que o bocal suavizado 3 obteve o maior comprimento de núcleo potencial, seguido do bocal suavizado 2.

Os resultados são pertinentes aos encontrados por Alam,^(6,7) que citam o modelo empírico apresentado abaixo:

$$\frac{1}{2 \ln(1 - \frac{V}{V_{SAÍDA}})} = 0,6035 \sqrt{\frac{\rho_{Ambiente}}{\rho_{Saída}}} \frac{x}{D_{Saída}} - 0,0841 \quad (3.1)$$

Onde: “V” - velocidade ao longo do eixo, “V_{Saída}” - velocidade na saída do bocal, “ρ_{Ambiente}” - Densidade ambiente, “ρ_{Saída}” - Densidade na saída do Bocal e “D_{Saída}” - Diâmetro da saída do bocal.

Os bocais trecho reto e suavizada 1 apresentaram maiores ondas de expansão na saída em comparação com os bocais suavizado 2 e 3. Este comportamento reduziu em aproximadamente 1% o comprimento núcleo potencial e menores números de Mach para uma mesma distância após o núcleo potencial.



6 CONCLUSÃO

As principais conclusões do trabalho são:

1. O trecho reto na região da garganta provoca queda na eficiência na transição das propriedades do gás;
2. A queda de eficiência provoca perdas prematuras de velocidade do jato e conseqüentemente perda de penetração no banho;
3. Perda de penetração implica em perda da eficiência do oxigênio na descarbonização do banho;
4. É necessário um maior aprofundamento no método das características para aprimoramento das geometrias de bocais para sopros de oxigênio;
5. As indústrias siderúrgicas já tem ao seu alcance a possibilidade de obter geometrias de bocais mais eficientes em suas operações reduzindo o tempo de sopro.

Agradecimentos

Os componentes do trabalho agradecem a UFMG pela estrutura dos laboratórios, e ao Prof. Ronaldo Sampaio da RS Consultants pelo apoio para apresentação dos trabalhos.

REFERÊNCIAS

- 1 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.
- 2 SHAPIRO, H. N., MORAM, M. J., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics.* Ed. New York: John Wiley & Sons, 1988. P.417-435.
- 3 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).
- 4 Innovative Turbulence Modeling: SST Model in ANSYS CFX. TECHNICAL BRIEF ANSYS. Disponível em: <<http://www.ansys.com>>. Acesso em: 29 dec. 2006.
- 5 FERRI, A. *Elements of Aerodynamics of Supersonic Flows.* New York: The MacMillian Company, 1949.
- 6 ALAM, M., et al. *Computacional Fluid Dynamics Modeling of Supersonic Coherent Jets for Electric Arc Furnace Steelmaking Process.* Metallurgical and Materials Transactions B, volume 41B, pag.1354-1367. Dec. 2010.
- 7 ALAM, M., et al. *Computacional Fluid Dynamics Simulation of Supersonic Oxygen Jet Behavior at Steelmaking Temperature* Metallurgical and Materials Transactions B, volume 41B, pag.636-645. Jun. 2010.