

ESTUDO DE CASO: DESGASTE NOS BOCAIS SUPERSÔNICOS DO BICO DE LANÇA DA ACIARIA BOF*

*Fabício Silveira Garajau¹
Paulo Roberto Cetlin²
Marcelo de Souza Lima Guerra³
Breno Totti Maia⁴
Dione Araújo Moreira⁵*

Resumo

O sopro de oxigênio é a principal operação durante o processo de refino de aço em aciarias BOF (*Basic Oxygen Furnace*). Este sopro é feito por uma lança de injeção de oxigênio através de bocais supersônicos, que devem ser dimensionados para as condições específicas de operação, como por exemplo, vazões e pressões de oxigênio, altura de banho, altura da lança em relação ao banho, etc. O mau dimensionamento destes bocais tem influência direta no tempo e eficiência de processo, além de comumente resultar em desgaste prematuro dos bocais e na retirada do bico de operação. Este tipo de falha tem sido observado em bicos da Vallourec Brasil. No presente trabalho será apresentada a metodologia de estudos e resultados de análise metalográfica em amostras de um bico de lança usado pela da empresa, além de simulações CFD (*Computational Fluid Dynamics*) realizadas para se caracterizar o mecanismo de desgaste dos bocais. Estas informações foram utilizadas como base para o redimensionamento dos bocais, objetivando conter os impactos causados pelo desgaste.

Palavras-chave: Bico; Bocais supersônicos; Desgaste; CFD; BOF.

CASE STUDY: WEAR OF A NOZZLE IN TIP LANCE OF STEELMAKING BOF.

Abstract

Oxygen blowing is the main operation in the steel refining process in BOF (Basic Oxygen Furnace) steelmaking. This blow is made by an oxygen injection lance through supersonic nozzles, which must be designed for the specific operating conditions, such as flow and oxygen pressures, height in relation to the metal bath, lance height, etc.. Bad design of these nozzles directly influences the time and process efficiency, and often results in premature wear of the nozzles and their removal from production. This type of failure has been observed in tip nozzles in Vallourec Brazil. This work presents a methodology of studies and results of metallography in samples of tips used by company, in addition to CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations of the gas jet. This information was used as a basis for the redesign of the nozzles, in order to reduce the impacts caused by wear.

Keywords: Tip; Supersonic nozzle; Wear; CFD; BOF.

¹ Engenheiro e Mestrando em Mecânica na UFMG; Pesquisador da Lumar Metals, sócio da ABM, MG, Brasil.

² Professor PhD. do Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, MG, Brasil.

³ Engenheiro Msc. Mecânico Pesquisador da Lumar Metals, sócio da ABM, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Dr. Metalurgista Pesquisador da Lumar Metals, sócio da ABM, MG, Brasil.

⁵ Engenheiro de Produção na Vallourec Brasil, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A lança de oxigênio é o equipamento utilizado para injeção de oxigênio, sendo constituída basicamente por três tubos concêntricos, com a passagem do oxigênio feita pelo tubo central, além dos tubos externo e intermediário utilizados para refrigeração à água. Em sua extremidade, contém uma ponta cilíndrica, também conhecida como “bico de lança” ou “cabeça de lança”, formada por bocais supersônicos angulares para saída de oxigênio e canais refrigeração. A Figura 1 apresenta uma típica lança de sopro utilizada em fornos BOF.

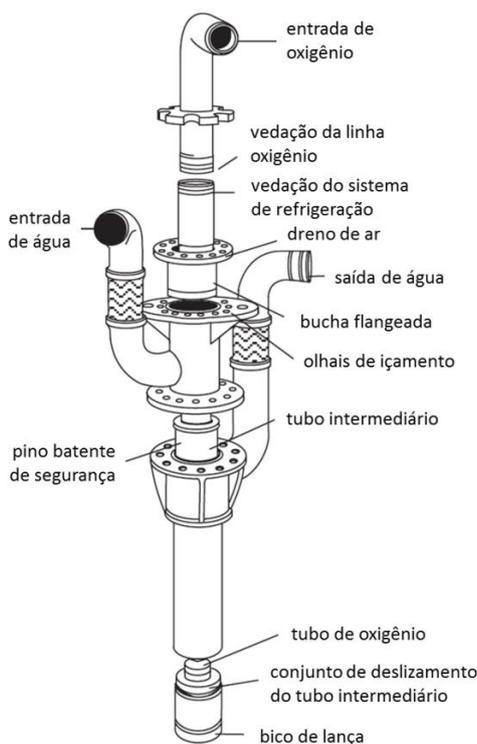


Figura 1: Montagem típica de lança de sopro em convertedores a oxigênio ⁽¹⁾.

A interação de um gás a alta velocidade com um banho líquido é um processo exclusivo da indústria metalúrgica ⁽²⁾. Nas primeiras aplicações comerciais do processo BOF, utilizava-se bico de lança com furo único central, no entanto com o aumento da capacidade dos convertedores, para evitar aumento do tempo de refino, aumentou-se a vazão de oxigênio. Isto provocou severas consequências, como: desgaste acentuado do revestimento refratário, excesso de projeções de metal líquido e descarbonização deficiente ⁽³⁾.

Como solução para os problemas supracitados surgiu-se os bicos de lança multi-furos, os quais podem chegar a seis bocais supersônicos, dependendo da capacidade e geometria do convertedor. O bico de lança é constituído por cobre eletrolítico (99,99% de pureza) de alta condutividade (mínimo de 85 IACS), podendo ser fundido, forjado ou centrifugado. A Figura 2 apresenta um desenho esquemático em corte do bico de lança utilizado pela empresa, onde se observa a entrada e saída de água de refrigeração e os três bocais supersônicos, sendo este o objeto de estudo do presente trabalho.

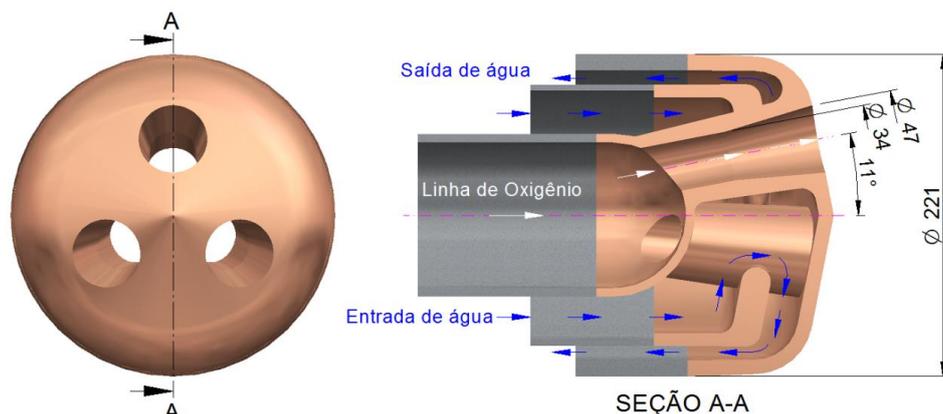


Figura 2 - Desenho esquemático do bico de lança utilizado pela Vallourec Brasil.

As condições de trabalho do bico de lança são severas devido a este trabalhar imerso na emulsão metal-gás-escória à elevada temperatura e onde se está presente diversas reações químicas exotérmicas. Muitos são os motivos de falha dos bicos de lança, dentre estes se destaca o desgaste na saída dos bocais supersônicos, devido à sua complexidade de compreensão. Na Figura 3 são apresentados vários bicos com configurações diferentes (ângulo dos bocais, número de furos, etc.) que falharam por desgaste na saída dos bocais supersônicos. Como se pode ver, a falha não está correlacionada com a quantidade de corridas que estes trabalham, mas sim aos parâmetros operacionais em relação à qual condição foi projetada. Considera-se falha no bico da lança quando desgasta-se o bocal, pois reduz a eficiência do jato supersônico de oxigênio.



Figura 3: Comparação entre falhas por desgaste de bocais para várias configurações de bico.

São importantes parâmetros operacionais da linha de oxigênio para o dimensionamento dos bocais: \dot{m} (vazão), P_0 (pressão de entrada), T_0 (temperatura de entrada) e P_a (pressão ambiente). Caso estes parâmetros estejam diferentes das condições previstas em projeto, o bico de lança pode desgastar-se rapidamente ⁽⁴⁾. O desgaste na saída dos bocais supersônicos têm sido um dos principais limitadores na vida de bicos de lança da Vallourec Brasil. O presente trabalho tem por objetivo caracterizar o mecanismo de desgaste na saída destes bocais supersônicos, através de análises metalográficas de amostras e simulações CFD, de forma a se correlacionar o desgaste com os fenômenos que ocorrem durante o processo. A partir destes resultados será apresentada uma nova geometria o qual não venha permitir o desgaste na saída dos bocais supersônicos, mas que mantenha as mesmas condições operacionais atualmente utilizadas pela empresa.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos básicos, bem como a metodologia e conceitos utilizados para as simulações CFD e nas análises metalográficas.

2.1 Fundamentação Teórica

Durante o processo de refino em fornos BOF ocorrem diversas variações de vazão, pressão, temperatura, reações químicas e etc., que podem favorecer o aumento na velocidade do desgaste. Um dos fatores mais relevantes para o desgaste na saída dos bocais supersônicos é a vazão de oxigênio, que na prática pode variar em torno de 20% acima ou abaixo da vazão média pretendida ⁽⁵⁾, fator a ser considerado nas simulações CFD. Todas as reações químicas de refino ocorrem durante o sopro de oxigênio, como resumidamente está apresentado na Figura 4.

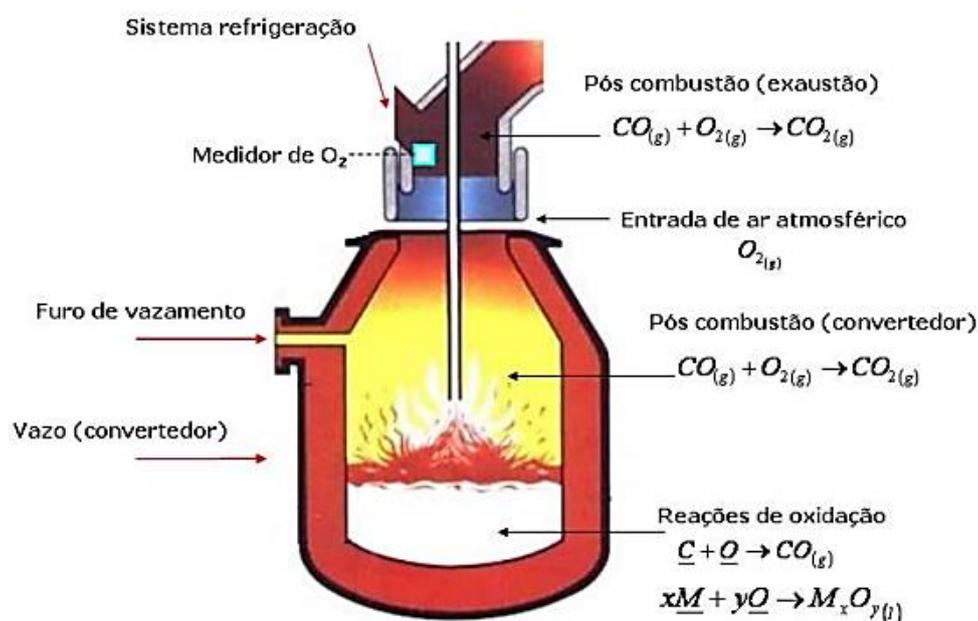


Figura 4: Desenho esquemático das reações que ocorrem no processo BOF ⁽⁶⁾.

Pode-se observar na Figura 4 que a reação química mais próxima do bico durante o processo é a de pós-combustão, o qual corresponde à oxidação do CO (proveniente

da descarburização do banho metálico realizado através da injeção de jatos supersônicos de oxigênio (O₂) formando o dióxido de carbono (CO₂). Segundo Maia (2007) ⁽⁵⁾ o gás na saída do convertedor possui composição química de 55 a 70 % de CO e de 30 a 35% de CO₂; já Miller e Jimenez *et al.* (1998) ⁽⁷⁾ citam valores de 90% de CO e 10% de CO₂. A diferença nos valores finais de CO e CO₂ encontrada pelos autores podem estar relacionadas às particularidades de cada processo, como por exemplo, a composição química da matéria prima utilizada no convertedor. Além dos parâmetros de processo, para a identificação do mecanismo de desgaste interessa a caracterização dos bocais pelo perfil de escoamento do jato supersônico. Como se trata de escoamento de um fluido compressível a velocidades superiores a velocidade do som, o número adimensional de Mach (M) é um importante parâmetro de análise, o qual correlaciona a velocidade do escoamento com a velocidade do som ⁽⁸⁾, através das equações 1 e 2.

$$M \equiv \frac{v}{a} \quad (1)$$

$$a = \sqrt{kRT} \quad (2)$$

Onde: a - Velocidade do som no meio (m/s), k - Razões dos calores específicos (C_p/C_v), R - Constante dos gases ideais [J/mol.K] T – Temperatura [°K].

A transição da velocidade sônica para supersônica ocorre na garganta do bocal, onde se tem a menor área de seção, atingindo Mach igual a 1. Na sessão divergente o número de Mach aumenta e pode atingir velocidades com Mach superiores a 2. A relação de áreas da garganta (A*) e na saída do bocal (A) com o número de Mach, estão apresentadas na pela equação 3 ⁽⁹⁾.

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[\left(\frac{2}{k+1} \right) \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{(k+1)}{2(k-1)}} \quad (3)$$

O fluido ambiente pode oferecer restrições ao escoamento do jato na saída do bocal com uma contrapressão (pressão no interior do convertedor), promovendo um equilíbrio entre as pressões. Os efeitos desta contrapressão geram ondas de choque, que caracterizam o escoamento quanto ao seu perfil de formação. Em geral todas as propriedades como pressão, velocidade, densidade e etc., são descontínuas através da superfície e podem ser classificadas em duas categorias: Obliquas (menor intensidade, normalmente mantém o escoamento supersônico) e Normal (maior intensidade, escoamento sempre se torna subsônico).

A contrapressão do ambiente externo (P_a) gera uma separação tangencial entre a extremidade do jato e o meio. As linhas de fluxo criadas em torno do jato se movem na direção do núcleo, promovendo transferência de calor e massa entre o jato e o meio ⁽¹⁰⁾. O jato supersônico também pode ser caracterizado pelo perfil de escoamento na saída do bocal. Para escoamentos com M > 1 e pressão de saída maior do que a pressão do ambiente (P_s>P_a) o bocal é caracterizado como sub-expandido (under expanded), representado esquematicamente na Figura 5a ⁽¹⁰⁾. 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.

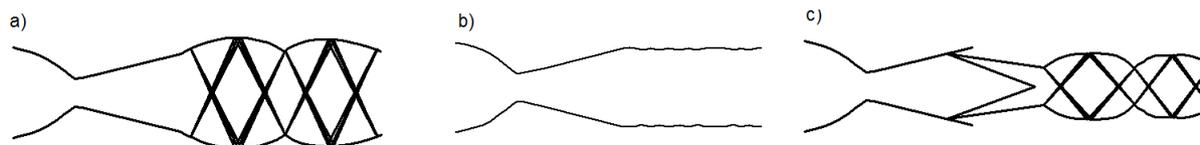


Figura 5: Tipos de bocais: a) sub-expandido, b) expansão ótima e c) sobre-expandido.

Quando a pressão de projeto for igual à pressão de trabalho ($P_s = P_a$) não ocorrerá ondas de choque normal em seu interior e o bocal atinge um regime de operação dito de expansão ótima (Figura 5b).

Para escoamentos com $M > 1$ e com a pressão na saída menor que a ambiente ($P_s < P_a$), o bocal é considerado sobre-expandido (*over expanded*), conforme apresentado na Figura 5c ⁽¹¹⁾. A contrapressão externa pode comprimir o jato e forçar a direção de expansão para dentro do bocal até um limite, caracterizado por ondas de choque com expansões e compressões. Apesar da elevada contrapressão, em vários pontos ainda prevalecem velocidades supersônicas. No entanto, ela pode propagar-se através da camada limite em torno do jato, uma vez que no entorno da camada limite podem variar de supersônico na interface com o núcleo central à zero na parede do bocal. Nesta região formada próximo as paredes do bocal existem regiões com velocidades subsônicas, gerando o descolamento de jato ⁽¹⁰⁾. Este fenômeno é apresentado na Figura 6.

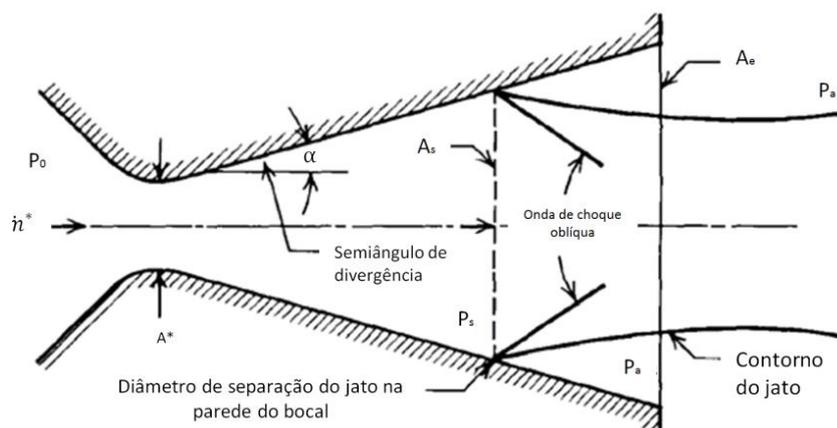


Figura 6: Bocal sobre-expandido com descolamento de jato ⁽¹⁰⁾.

2.2 Modelagem Matemática

O caso estudado no presente trabalho possui grande complexidade matemáticas por se tratar de um problema que envolve escoamento compressível com reações químicas a alta temperatura. Assim se faz necessário utilizar algum modelo que contenha equações para balanço de massa, momento, energia, turbulência e reações químicas escoando-se em um domínio 3D.

Para solucionar este problema, utilizou-se software comercial de CFD Ansys CFX 14.0 o qual se baseia no método de volumes finitos para solução das equações de transporte que regem o escoamento. Este método divide a geometria em volumes de controles infinitesimais, e então resolve numericamente as equações de transporte para cada princípio físico ⁽¹²⁾.

As equações de transporte a ser resolvida para o caso estudado são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Equações de conservação para a fase gasosa ⁽¹²⁾.

Massa	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m$	<ul style="list-style-type: none"> ○ ∇ - derivada espacial em um sistema de coordenadas. ○ ρ - densidade ○ \vec{v} - velocidade ○ S_m - massa adicionada na fase contínua
Momento	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$	<ul style="list-style-type: none"> ○ $\rho \vec{g}$ - forças gravitacionais. ○ \vec{F} - forças externas. ○ $\bar{\tau}$ - tensor de tensões.
Energia	$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v h_{tot}) - \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla (v \tau) + v \cdot S_m + S_e$	<ul style="list-style-type: none"> ○ $\nabla (v \cdot \tau)$ - trabalho das tensões viscosas ○ $v \cdot S_m$ - trabalho devido às forças de momento ○ (h_{tot}) - entalpia total
Cinética Turbulenta (K)	$\frac{\partial (\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \vec{v} K) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho \omega K + P_{kb}$	<ul style="list-style-type: none"> ○ ρ - densidade ○ \vec{v} - velocidade ○ P_k - turbulência devido às forças viscosas ○ β' - constante ○ σ - constante
Dissipação Turbulenta (ω)	$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \vec{v} \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b}$	<ul style="list-style-type: none"> ○ ρ - densidade ○ \vec{v} - velocidade ○ P_k - turbulência devido as forças viscosas ○ β' - constante ○ σ - constante
Fração de Mistura (Z)	$\frac{\partial (\rho Z)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho Z)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial Z}{\partial x_j} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> ○ D - coeficiente de difusão dos escalares ○ ρ - densidade

A combustão depende diretamente da quantidade de misturas e químicas envolvidas, assim, a velocidade com que estas reações ocorrem é crucial para o resultado da chama gerada na combustão, principalmente em escoamentos turbulentos. Para reações rápidas, o progresso da reação é limitado pela mistura turbulenta, proporcionando chamas “quentes”. Em contra partida, para reações lentas o progresso é limitado pela cinética química, e resulta em uma chama “fria”, devido a misturas com baixo oxigênio ⁽¹³⁾.

Observa-se que não há uma equação de transporte para espécies químicas, isto porque no presente trabalho utilizou-se o modelo de combustão Flamelet, o qual é baseado no modelo PDF (*Probability Density Function*). Este modelo tem como objetivo gerar uma tabela com valores estatisticamente calculados das espécies químicas com relação à apenas fração de mistura (Z). Sendo assim, este modelo exige menos recurso computacional quando comparados a outros modelos de combustão os quais utilizam uma equação de transporte para cada espécie química. Para se calcular a tabela PDF, utiliza-se a equação 5 ⁽¹²⁾.

$$\tilde{Y}_i = \tilde{Y}_i(\tilde{Z}, \tilde{Z}''^2, \tilde{X}_{st}) = \int_0^1 \tilde{Y}_i(\tilde{Z}, \tilde{X}_{st}) \cdot P_{\tilde{Z}\tilde{Z}''^2}(Z) \partial Z \quad (5)$$

Para solução das equações, é necessário definir a geometria (domínio) do problema e as condições de contorno que serão detalhadas na próxima seção.

2.3 Modelagem Numérica

Devido à complexidade das condições reais de operação necessita-se restringir o domínio a ser simulado, de maneira que possibilite estimar as condições de contorno para dar ênfase ao objeto de estudo (desgaste na saída do bocal supersônico). Para composição do domínio utilizou-se simetria geométrica de apenas um bocal e metodologia semelhante aos trabalhos de Guerra *et al.* (2015)⁽¹⁴⁾ e Odenthal (2006)⁽¹⁵⁾, representada pela Figura 7, considerando 1/15 da circunferência do bocal.

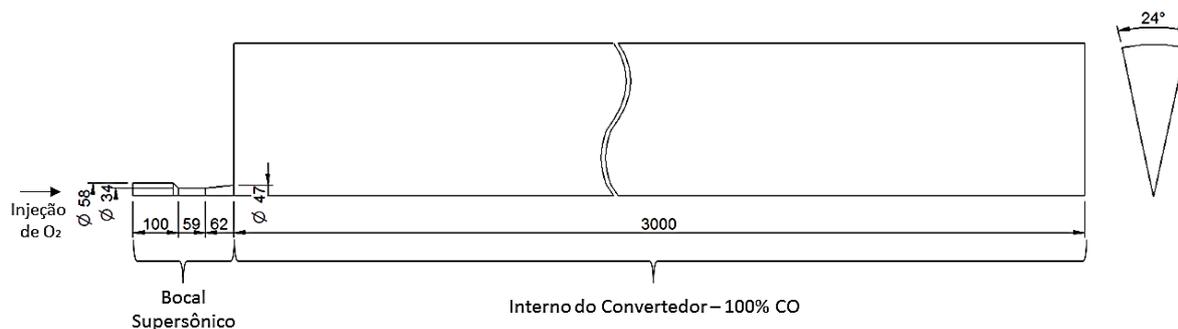


Figura 7: Desenho esquemático da geometria utilizada para as simulações CFD.

Como condições de contorno, o O_2 é injetado pelo bocal em um ambiente externo composto de CO , tentando se aproximar das condições do convertidor durante a descarburização. O domínio foi discretizado com malha hexaédrica de 1.005.000 elementos (Figura 8), com refinamento no tamanho dos elementos nas regiões próximas ao bocal, de forma a possibilitar maior precisão no cálculo das ondas de choque, turbulência do escoamento e temperatura nesta que é a região de interesse.

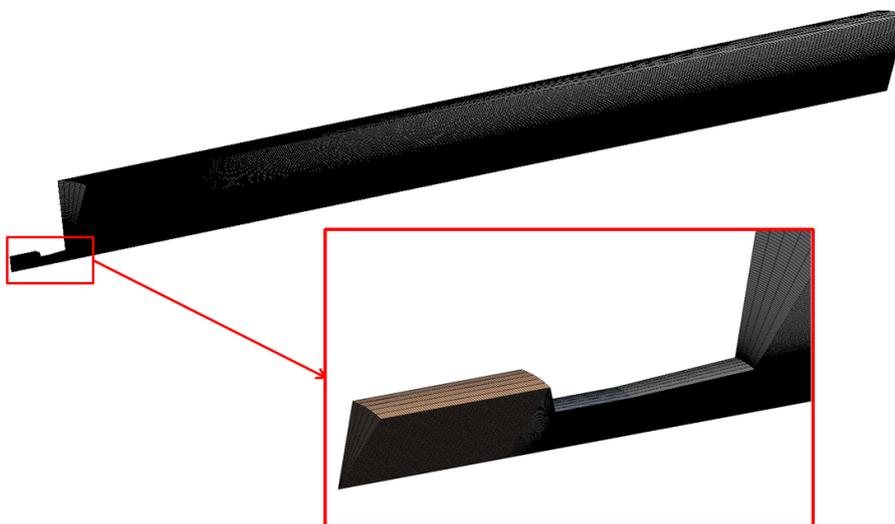


Figura 8: Malha utilizada para as simulações CFD.

Na Tabela 2 estão apresentadas as vazões, temperatura, bem como os modelos de combustão e turbulência utilizados nas simulações.

Tabela 2: Matriz de simulações CFD

	Vazão [m ³ /min]	Relação A/A*	Temp. amb. [°C]	Tipo de bocal
Simulação 1	180	1,38	1600	Falhado
Simulação 2	150	1,38	1600	Falhado
Simulação 3	180	1,15	1600	Redimensionado
Simulação 4	150	1,15	1600	Redimensionado

As vazões utilizadas nas simulações de 180 Nm³/h e 150 Nm³/h se referem à vazão máxima e mínima comuns da operação, respectivamente. A relação de área entre a seção de saída e seção estagnante (A/A*) é única diferença entre os dois modelos de bocal falhado e redimensionado. O resíduo numérico especificado nas simulações é de 10⁻⁶, ou seja, o erro não pode ser maior que 0,0001%. O método de resolução utilizado foi o *High Resolution*, o qual proporciona uma menor dispersão dos resultados interpolados.

2.4 ANÁLISES METALGRÁFICAS

Amostras dos bocais falhados foram divididas em três regiões distintas do bico (Figura 9) para análises metalográficas, de forma a possibilitar a verificação de possíveis variações microestruturais causadas pelo desgaste.

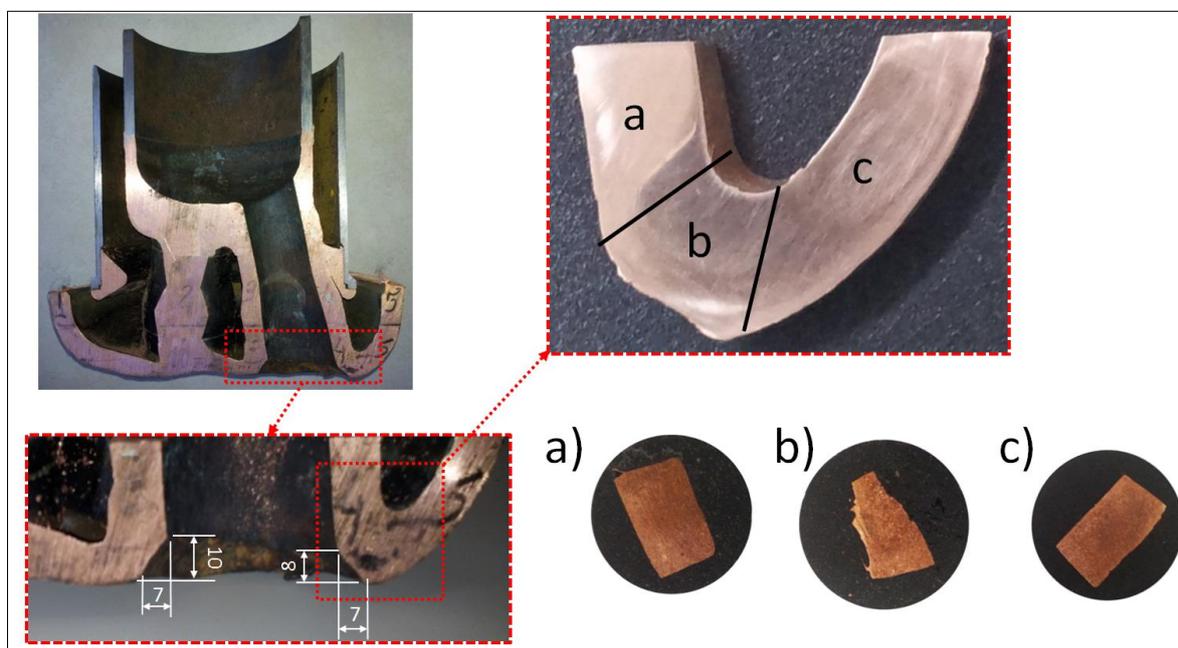


Figura 9: a) região do bocal sem desgaste; b) região de desgaste e c) face externa do bico.

As amostras das Figuras 9a e 9b estão localizadas dentro do bocal, sendo a amostra 9b a parte que apresentou falha por desgaste e a 9a uma parte interna do bocal sem desgaste. A Figura 9c apresenta uma amostra da face externa do bico, parte que fica totalmente exposta ao ambiente externo do forno. Após o embutimento, as amostras necessitam de polimento em politriz metalográfica, com

tratamento superficial apropriado. Após o polimento as amostras de cobre foram atacadas quimicamente por imersão em solução de Cloreto de ferro III ⁽¹⁸⁾.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se na figura 10 os resultados das simulações 1 e 2 onde se verificam diferenças no escoamento pelo número de Mach para o bocal desgastado na maior e menor vazão de operação. Na simulação 1 o perfil característico de bocal é sobre-expandido com formação de ondas de choque oblíqua na saída do bocal. O escoamento da simulação 2 também caracteriza o bocal como sobre-expandido, entretanto ocorre o efeito de descolamento de jato no interior do bocal.

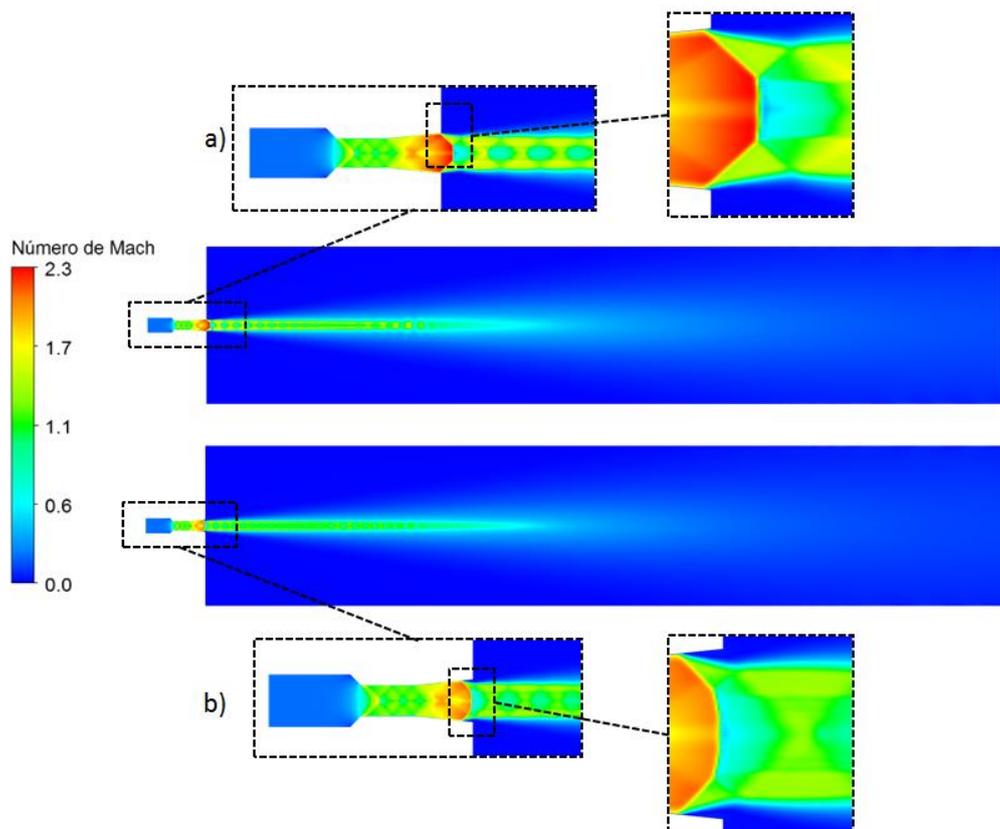


Figura 10: Número de Mach: a) Simulação 1 e b) Simulação 2

Na figura 11, verifica-se que ocorre a pós-combustão do CO pelo aumento da temperatura de 1600°C para um patamar acima de 3000°C nas duas simulações. Pode-se observar também que o descolamento de jato na simulação 2 ocasionou o início da pós-combustão no interior do bocal. O perfil de descolamento de jato observado nas Figuras 10b e 11b são semelhantes à teoria apresentada por Zuker e Biblarz (2002) ⁽¹¹⁾, conforme apresentado na Figura 5c. A distância para dentro do bocal até o início do descolamento do jato encontrada nas simulações (Figura 11b) foi cerca de 10mm, e é muito próxima do comprimento médio de desgaste encontrado nas amostras da Figura 9.

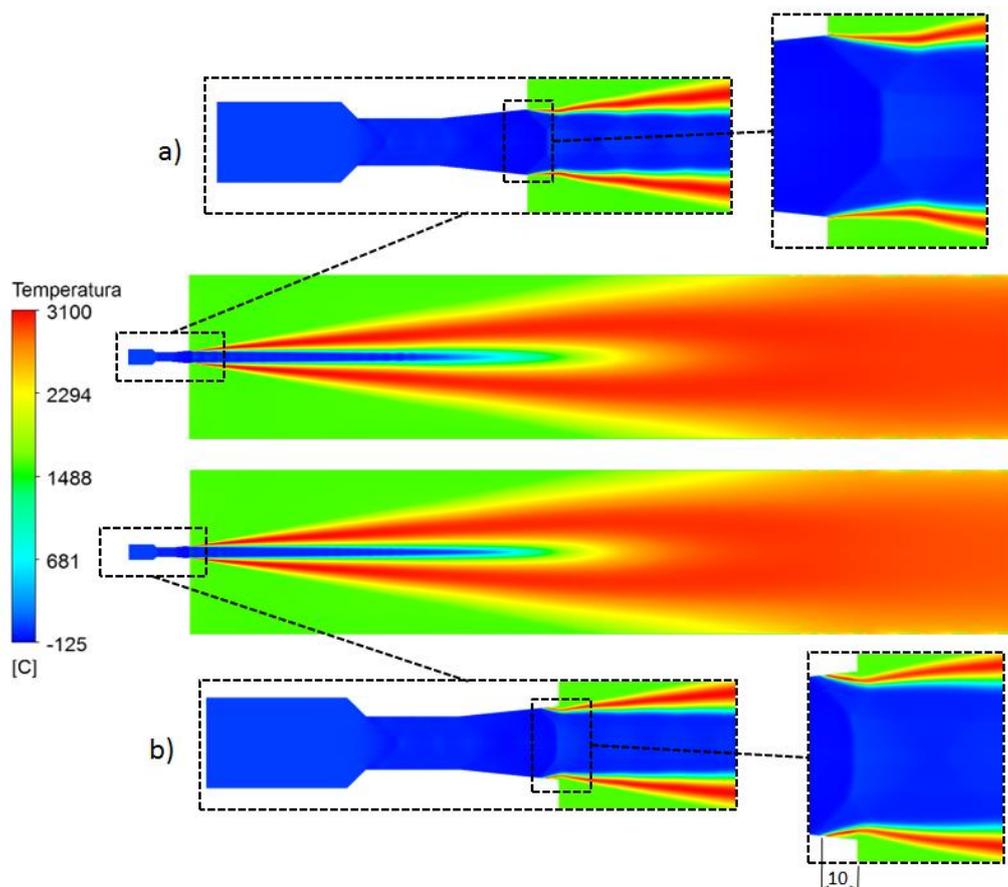


Figura 11: Gradiente de temperatura: a) Simulação 1 e b) Simulação 2.

A pós-combustão se inicia no interior do bocal em função da zona de pressões negativas formadas pelo descolamento do jato, que succiona o CO do ambiente externo para dentro do bocal promovendo a mistura com o oxigênio das extremidades do jato. Este fenômeno pode ser melhor compreendido através da análise da velocidade nas linhas de fluxo do escoamento no interior do bocal na Figura 12.

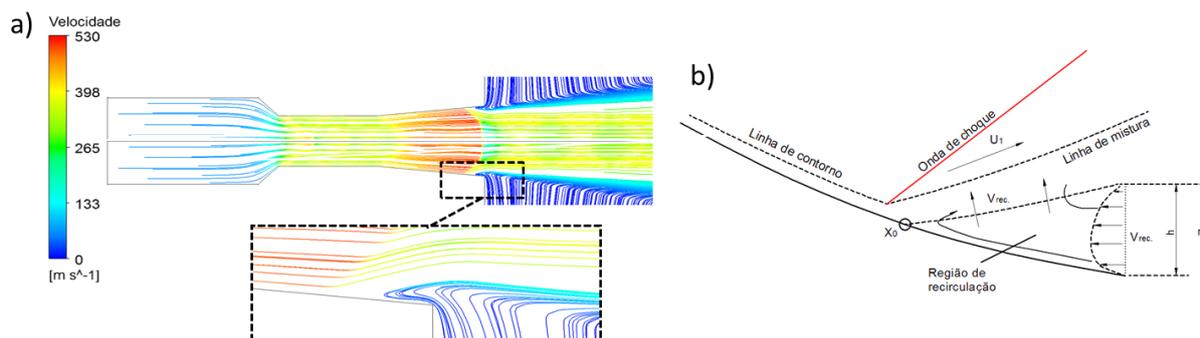


Figura 12: a) Simulação 2: Linhas de fluxo do escoamento; b) Teoria de comportamento do fluxo de escoamento quando ocorre descolamento de do jato no interior do bocal ⁽¹⁷⁾.

Os resultados encontrados nas análises metalográficas podem contribuir para o entendimento e comprovação da ocorrência dos efeitos da pós-combustão no interior do bocal, conforme figura 13.

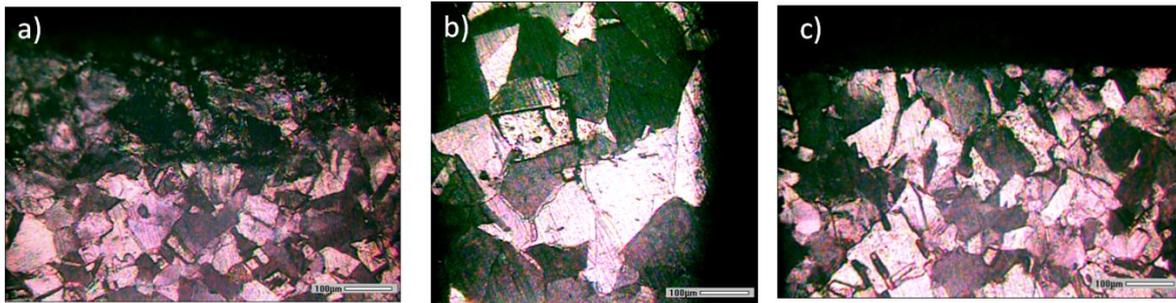


Figura 13: Metalografia com ampliação de 200X: a) Face externa do bico; b) Região de desgaste e c) região do bocal sem desgaste.

Analisando a Figura 13 observa-se que na face externa do bico que fica exposta ao ambiente do forno (Figura 13a) ocorrem fusões de alguns grãos, que pode indicar um superaquecimento localizado em um curto espaço de tempo, pois o restante da estrutura permanece inalterada. Comparando os resultados da figura 13b e 13c, regiões internas do bocal com e sem desgaste, verifica-se que um considerável crescimento de grãos ocorreu na região de desgaste. Estima-se por cálculos analíticos de transferência de calor que ao ser exposto a temperaturas de pós-combustão acima de 3000°C, o cobre esteja a uma temperatura de aproximadamente 1115°C nesta região, em função da refrigeração interna. Assim é possível o crescimento dos grãos nas regiões próximas da “zona de fusão”, visto que o bico é fabricado pelo processo de forjamento em matriz fechada e possui estrutura granulométrica refinada, e ao ser exposta a uma temperatura acima da temperatura de recristalização do cobre (~800°C) pode ocorrer este crescimento, conforme princípios teóricos apresentados por Dieter (1961)⁽¹⁸⁾ e Reed-Hill (2009)⁽¹⁹⁾.

Com o cobre atingindo temperaturas acima de sua temperatura de fusão (~1085°C) a tendência é que o material comece a se fundir gradativamente, começando pelos pontos de concentração de temperatura (quina do bocal). O crescimento de grãos reforça esta hipótese, pois como a temperatura está pouco acima do ponto de fusão o desgaste do bocal seria progressivo. Nas regiões próximas a esta fusão ocorreria o crescimento de grãos de forma similar ao que acontece nas zonas termicamente afetadas (ZTA) do processo de soldagem.

Na Figura 14 estão apresentados os resultados de número de Mach para as simulações 3 e 4, onde observa-se que para a maior vazão de operação (Figura 14a) o bocal se caracteriza como expansão ideal. Na menor vazão (Figura 14b) o bocal apresenta sobre-expansão desprezível, o que não provocaria o desgaste na saída do bocal supersônico.

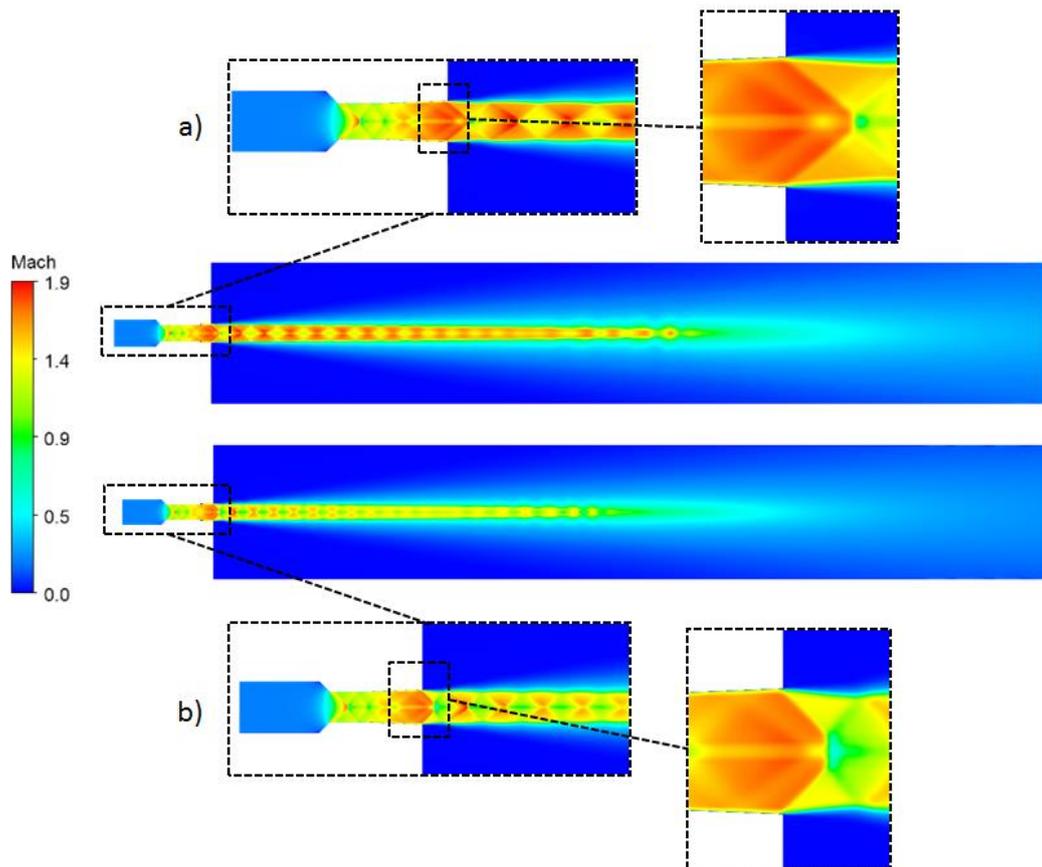


Figura 14: Número de Mach: a) Simulação 3 e b) Simulação 4.

Verifica-se também (Figura 14) um jato com maiores número de Mach no núcleo efetivo por um maior comprimento que nas simulações 1 e 2, com formação mais homogênea das ondas de choque na saída do bocal. Na simulação 4, observa-se uma redução do comprimento efetivo do jato comparada a simulação 3, entretanto sem ocorrer expansão e descolamento do jato dentro do bocal, como o verificado na simulação 2 (Figura 10b).

Analisando a distribuição de temperatura da Figura 15, nota-se que a pós-combustão na maior e menor vazão acontece somente fora do bocal. O perfil de temperatura é bem semelhante para as duas condições de vazão, com um pequeno aumento da temperatura próxima ao jato na simulação 3. Como no bocal redimensionado não se verificou pós-combustão em seu interior, a tendência é que se tenha uma considerável redução na velocidade ou eliminação do desgaste.

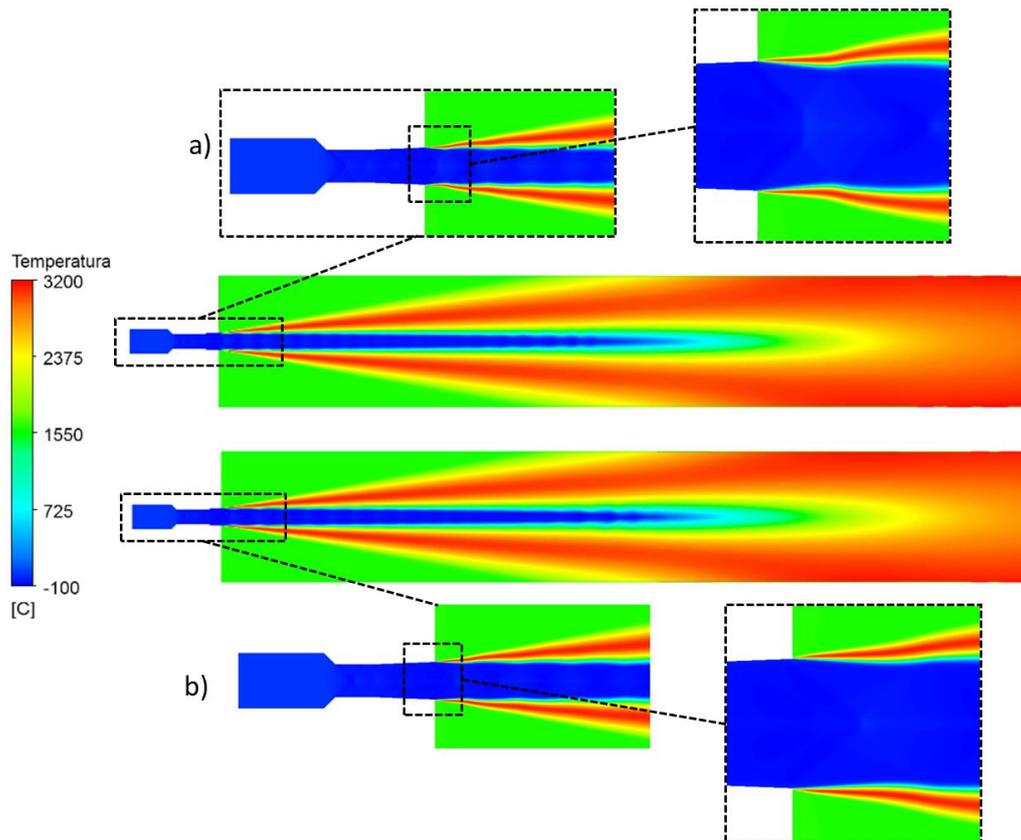


Figura 15: Gradiente de temperatura: a) Simulação 3 e b) Simulação 4.

No gráfico da Figura 16 também se pode confirmar que o bocal redimensionado apresenta um maior comprimento do núcleo efetivo do jato para a maior e menor vazão de operação, quando comparado ao bocal com desgaste. Observa-se que o bocal falhado atinge um número de Mach maior que o redimensionado, nas duas vazões, somente na saída do bocal. Isso ocorre em função da grande onda de choque oblíqua que se forma exatamente na saída do bocal, fazendo com que o jato perca velocidade. Esta perda de velocidade é minimizada no bocal redimensionado.

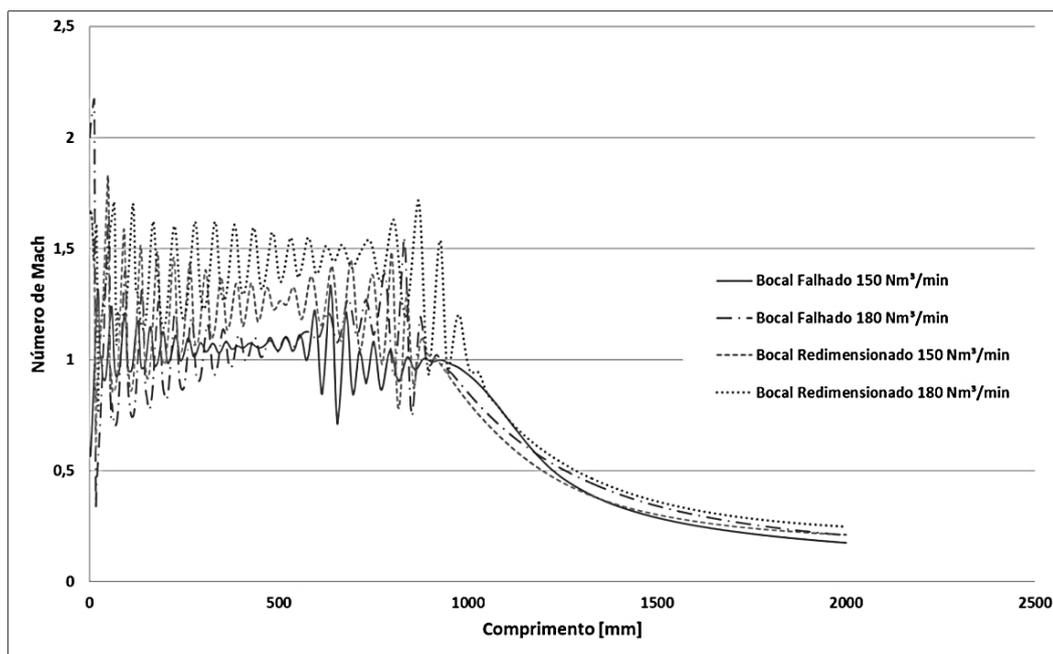


Figura 16: Comprimento de jato pelo número de Mach para as simulações 1, 2, 3 e 4.

4 CONCLUSÃO

A partir das simulações CFD pode-se verificar que ocorrem reações de pós-combustão entre o CO proveniente do processo de refino e o O₂ remanescente do jato, e estas têm grande influência na distribuição de temperatura e perfis de escoamento do jato. Observou-se também a ocorrência de descolamento de jato e início de pós-combustão no interior do bocal falhado na menor vazão de operação. Este descolamento propiciou o início da pós-combustão no interior do bocal. Os resultados das análises metalográficas reforçam esta hipótese, visto que ocorreu crescimento de grãos somente na região de desgaste, fato que só seria possível com exposição localizada à altas temperaturas. O mecanismo de desgaste pode ser caracterizado como a fusão localizada do material, pois o cobre atinge temperaturas acima do ponto de fusão (~1115°C) quando exposto à chama da pós-combustão (~3000°C). O comprimento médio de desgaste (Figura 9) também foi parâmetro para validação dos resultados das simulações em CFD, visto que foi condizente com o comprimento encontrado nas amostras.

O bocal redimensionado não apresenta descolamento de jato, e entende-se que ocorrerá um aumento no número de corridas para início ou eliminação do desgaste nos bocais. Pode-se observar também que o bocal redimensionado tende a aumentar a efetividade do jato devido ao aumento do número de Mach no comprimento efetivo, o que implicará em maior penetração no banho e, conseqüentemente, velocidade nas reações de refino.

Com isso, pode-se concluir que ferramentas de simulação CFD pode ser um grande auxílio no dimensionamento de bocais supersônicos de bico de lança, por possibilitar um maior número de variáveis existentes no processo, quando comparado aos métodos analíticos. E também que é possível se projetar um bico que não se desgaste mesmo com as variações de parâmetros operacionais, inerentes no processo de fabricação do aço.

Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar o seu agradecimento à Lumar Metals, à UFMG e à Vallourec Brasil pelo apoio ao desenvolvimento das experiências conduzidas para a realização desse trabalho. Ao eterno amigo Bruno Orlando de Almeida Santos (in memoriam).

REFERÊNCIAS

1. BARKER, K. J., PAULES, J. R., RYMARCHY, N. J., & JANCOSO, R. M.: *Oxygen Steelmaking Furnace Mechanical Description and Maintenance Consideration*. In: *The Making, Shaping and Treating of Steel* (11ª ed., pp. 431-474). Pittsburgh: Copyright, 1998.
2. SZEKELY, J., & THEMELIS, N. J.: *Rate Phenomena in Process Metallurgy*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1971.
3. MAIA, B. T.; MARTINS, A. A. Lança de Oxigênio e Características do Jato. In: Curso ABM de Aciaria à Oxigênio. São Paulo, 2012. Cap. 8.
4. SMS SIEMAG. *Calibration System for Oxygen-Blowing Lances*. Düsseldorf, p. 7. 2012.
5. MAIA, T. Efeito da Configuração do Bico da Lança na Interação Jato-Banho Metálico em Convertedor. UFMG. Belo Horizonte, p. 134. 2007.
6. MOTTA, L. S. Análise qualitativa da descarburização do MRPL da Arcelor Mittal Inox Brasil através do teor de oxigênio do gás da exaustão. UFMG. Belo Horizonte. 2011.

7. MILLER, T. W. *et al.* Oxygen Steelmaking Processes. In: *Steelmaking and Refining*. Pittsburgh: Copyright, 1998. Cap. 9, p. 475-524.
8. 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).
9. 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.
10. ZUCROW, M. J., & HOFFMAN, J. D.: *Gas Dynamics* (Vol. I). Toronto: John Wiley & Sons, Inc, 1976.
11. ZUKER, R. D., & BIBLARZ, O.: *Fundamentals of Gas Dynamics* (2ª ed.). California: JOHN WILEY & SONS, 2002.
12. CFX 15.0. *Solver Theory Guide*. Ansys. USA. 2013.
13. BACCHI, R. D. A. *Best Practice Guidelines for Combustion Modeling*. ESSS. Atibaia, SP. 2013.
14. GUERRA, M. d., GARAJAU, F. S., BARROS, J. M., & MAIA, B. T.: Desgaste em Bocais de Lança - Simulações CFD e Condições Reais - 46º Seminário de Aciaria Internacional. Rio de Janeiro, agosto 2015.
15. ODENTHAL, H.-J., FALKENRECK, U., & SCHLUTER, J.: *CFD Simulation of Multiphase Melt Flows in Steel Making Converters*. *European Conference on Computational Fluid Dynamics*, 2006.
16. ROHDE, R.: *Metalografia e Preparação de Amostras: Uma abordagem prática*. URI , Santo Ângelo, 2010.
17. ALMQVIST, M.: *Semi-empirical Model for supersonic flow separation in rocket nozzle*. Dissertação de mestrado, Departamento de Ciências Espaciais, Kiruna, 2005.
18. DIETER, Jr, George E. *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, New York, 1961.
19. REED-HILL RE., Abbachian R, Abbachian L: *Physical metallurgy principles*. Stanford: Cengage Learning, 2009.