



ESTUDO DO ESCOAMENTO NO INTERIOR DAS COIFAS DOS SISTEMAS DE DESPOEIRAMENTO PRIMÁRIO DOS CONVERTEDORES LD DA ARCELORMITTAL TUBARÃO UTILIZANDO A FERRAMENTA CFD (*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*)¹

Rafael Sartim²
Vladimir Rangel Zanetti³
Ruben Carlos Pinasco⁴
Filipe Carvalho Pires⁵

Resumo

Um modelo computacional foi gerado neste trabalho para simular o escoamento de gás nas coifas do sistema de despoejamento primário dos convertedores LD da ArcelorMittal Tubarão. Motivado pelo histórico de falhas por desgaste nas paredes das coifas o objetivo do trabalho é de compreender as características do escoamento para que se possa reduzir as taxas de desgaste. Para este estudo foi utilizada a ferramenta CFD através do pacote comercial ANSYS CFX 11. Os resultados mostram que há basicamente dois mecanismos de desgaste nas coifas. Um é erosão devido a projeção do material particulado em alta velocidade na parede posterior da curva de saída da coifa. O outro mecanismo é de abrasão, devido a decida do material particulado mais pesado no sentido contrário ao fluxo presente na zona de baixa velocidade na região de inclinação da coifa.

Palavras-chave: Conversor LD; Simulação numérica; Escoamento; Desgaste.

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC STUDY OF FLUID FLOW INSIDE THE ARCELORMITTAL TUBARÃO BOF HOOD OF PRIMARY DEDUSTS SYSTEM

Abstract

A numerical simulation were performed to simulate the fluid flow inside a BOF hood of the ArcelorMittal Tubarão converters. Motivated by the historical failure due to wear in the walls of the hood the objective of the present work is to understand the flow structure, so that we it can reduce wear rates. For this study it was used a CFD commercial package ANSYS CFX 11. The results show that there are basically two mechanisms of wear in the hoods. One is erosion due the projection of the particulate material at high speed in the posterior wall of the output curve of the hood. The other mechanism is abrasion due the falling down of the heavier particulate in the opposite direction to the flow in the region of low speed in the slope of the hood.

Key words: LD converter; Numerical simulation; Fluid flow; Wear.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2010, Resende, RJ, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, MSc, Especialista de Engenharia Mecânica da ArcelorMittal Tubarão, Serra, ES, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Especialista de Engenharia Mecânica da ArcelorMittal Tubarão, Serra, ES, Brasil.

⁴ Engenheiro Mecânico, Especialista de Engenharia Mecânica da ArcelorMittal Tubarão, Serra, ES, Brasil.

⁵ Engenheiro Mecânico.



1 INTRODUÇÃO

Os gases injetados durante o sopro de oxigênio em convertedores (BOF), juntamente com resultado das reações de oxidação e combustão do monóxido de carbono, são captados por uma coifa de resfriamento que conduz o gás ao sistema de lavagem de gás. Este é denominado sistema de despoeiramento primário.⁽¹⁾ Os convertedores 01 e 02 da siderúrgica ArcelorMittal Tubarão (AMT) apresentam um histórico de falhas freqüentes devido ao desgaste em suas coifas. Os gases exauridos contêm uma grande quantidade de material particulado proveniente das reações ocorridas no interior do vaso do convertedor. Essas partículas são carregadas pelos gases em todo escoamento ao longo da coifa e seu cisalhamento com a parede provoca níveis de desgaste acentuados em determinadas regiões. Visto que, as paredes são compostas por tubos por onde passa água para conduzir calor e resfriar os gases, esse desgaste acarreta em furos nos tubos fazendo com que ocorra vazamento de água para dentro da coifa e conseqüentemente no interior do vaso do convertedor. Tal situação é extremamente perigosa para o processo, pois a mistura entre a água e o banho de aço pode gerar uma possível reação podendo provocar acidentes e paradas de produção.

Com intuito de se reduzir o desgaste nas paredes, torna-se necessário a compreensão do comportamento dos gases no escoamento ao longo da coifa. Por se tratar de um processo de alta complexidade metalúrgica onde ocorrem diversos fenômenos físicos, existem poucos modelos matemáticos e dados sobre os valores de velocidade, trajetórias e temperaturas dos gases dentro do vaso e ao longo da coifa. Grande parte dos estudos aplicados aos convertedores LD tem como objetivo: analisar a injeção de oxigênio no banho, os tipos e a geometria de lança, a injeção de argônio pelo fundo do convertedor, o movimento do aço líquido durante o sopro e durante o basculamento do convertedor entre outros, podendo se citar Odenthal.⁽²⁾ Entretanto, existem alguns trabalhos relacionados a análise do desgaste na parede de coifa de convertedor LD.⁽³⁻⁵⁾

Medições em campo são bastante limitadas devido aos riscos do processo e ao alto custo. Nesse contexto, a ferramenta computacional CFD (*Computational Fluid Dynamics*) desperta grande interesse, principalmente por envolver tempo e custos menores do que métodos experimentais, além da possibilidade vasta de solução dos mais variados fenômenos.

Baseado no histórico de falhas em coifas, o objetivo deste trabalho é investigar, através da simulação numérica, as características do comportamento fluidodinâmico dos gases de exaustão exauridos no sistema de despoeiramento primário dos convertedores LD da AMT. Especificamente, o trabalho é realizado em duas etapas. Na primeira, é simulado o escoamento no interior da coifa do convertedor 01, visto que, tanto sua geometria quanto seus parâmetros operacionais são semelhantes ao convertedor 02. Na segunda etapa, é simulado o escoamento numa coifa de geometria semelhante ao convertedor 03, porém com os parâmetros operacionais do convertedor 01 com intuito de se avaliar o resultado de uma possível troca de geometria da coifa do convertedor 01.



2 MODELAGEM MATEMÁTICA

2.1 Equações Governantes

As equações governantes utilizadas neste trabalho estão baseadas em três princípios físicos da dinâmica dos fluidos, Conservação da quantidade de movimento, Conservação de massa e Conservação de energia. Portanto, as equações que regem o comportamento das propriedades de um fluido newtoniano são descritas por:

Equação da Conservação de Massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Equação da Conservação da Quantidade de Movimento

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \rho g \delta_{3i} \quad (2)$$

onde,

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \left(P + \frac{2}{3}\mu \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Equação da Conservação de Energia

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_c \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \Phi + \left(\frac{\partial p}{\partial t} + U_i \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + H \quad (4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x_i} = c_p \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (5)$$

onde μ é a viscosidade molecular do fluido, g a constante gravitacional, x_i as componentes das coordenadas, U_i a componente da velocidade na direção i , P é a pressão, ρ , μ_{lam} , c_p e k_c são, respectivamente, a massa específica, a viscosidade molecular do fluido, calor específico a pressão constante e a condutividade térmica do fluido. H é a fonte de energia, Φ é a dissipação viscosa da energia e T a temperatura do fluido.

2.2 Modelagem da Turbulência

Para modelar os efeitos da turbulência no escoamento ao longo da coifa, foi utilizado o modelo de turbulência κ - ϵ por ser atualmente o modelo mais difundido pelos códigos computacionais em aplicações de dinâmica dos fluidos, pois é um modelo capaz de produzir bons resultados exigindo um baixo custo computacional. Para condições estacionárias as equações de κ (Energia cinética turbulenta) e ϵ (Dissipação da energia cinética turbulenta) são:

$$\frac{\partial(\bar{U}_j \kappa)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_{turb}}{\rho \sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + P_\kappa + G_\kappa - \epsilon \quad (7)$$



$$\frac{\partial(\bar{U}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_{turb}}{\rho \sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_1 P_\kappa + C_3 G_\kappa) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (8)$$

Onde σ_κ e σ_ε são constantes empíricas, P_κ é a produção de energia cinética turbulenta através das tensões de cisalhamento proposto por Kato and Launder,⁽⁶⁾ G_κ é a produção de energia cinética turbulenta devido as forças de empuxo e C_1 , C_2 , C_3 e σ_ε são constantes empíricas.

2.3 Modelagem da Radiação

Os gases exauridos pelo sistema de despoejamento primário entram na coifa a uma temperatura extremamente elevada em comparação à temperatura dos tubos da parede da coifa. Dessa forma, há um alto gradiente de temperatura gerando um fluxo de calor do gás para a parede. Pode-se considerar dois modos de transferência de calor para essa situação, convecção e radiação. A radiação térmica para esse tipo de aplicação é considerado como um fenômeno volumétrico, onde o meio absorve, emite e espalha energia radiante. Conforme estudo realizado por Galarça,⁽⁷⁾ quanto maior o volume de gás num escoamento no interior de um tubo, maior é a transferência de calor por radiação térmica no sistema. Tal fato, sugere que para uma aplicação onde o volume de gás ultrapassa os 100.000 m³/h num tubo com diâmetro superior a 3 m e temperatura próxima a 2.000°C a transferência de calor por radiação seja significativa, ou mesmo, o modo principal de transmissão de calor.

A equação 9 é a equação de transporte de radiação que é adicionada à equação de conservação de energia. Para resolvê-la, é utilizado o modelo Monte Carlo.

$$\frac{dI(r, s)}{ds} = kI_b(r) - kI(r, s) - \sigma_s I(r, s) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int I_-(s_i) \Phi(s_i, s) d\Omega_i \quad (9)$$

Onde I é a intensidade de emissão espectral e I_b a intensidade de emissão de Corpo Negro, K é o coeficiente de absorção.

2.4 Condições de Contorno

O domínio computacional é representado pela geometria das coifas. São duas geometrias, uma para os convertedores 01 e 02, pois são equivalentes e outra para o convertedor 03. A coifa do convertedor 01, possui dois diâmetros diferentes. A coifa móvel localizada na regiões por onde entra o gás tem diâmetro de 3.770 mm enquanto o restante da coifa, denominada de coifa fixa, 3.195 mm. A coifa do convertedor 03 tem diâmetro maior e único com valor de 4.330 mm.



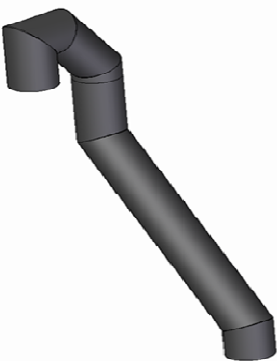
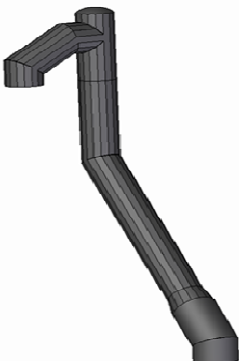
Coifa Convertedor 03	Coifa Convertedores 01/02
	
Diâmetro da coifa móvel: 4330 mm Diâmetro da coifa fixa: 4330 mm	Diâmetro da coifa móvel: 3770 mm Diâmetro da coifa fixa : 3196 mm

Figura 1 – Geometria das coifas dos convertedores 01, 02 e 03.

A simulação computacional foi realizada com base nos dados operacionais coletados no sistema de monitoramento de processo da aciaria da ArcelorMittal Tubarão. Os dados foram escolhidos em um determinado instante durante o sopro de oxigênio em que a vazão de gás na coifa atinge seu valor máximo. A Figura 2 mostra o registro do processo do dia 15 de março de 2009 de 17:07:33 à 17:11:25 h do convertedor 02. Os dados utilizados são os dados do instante de fim do sopro de oxigênio (17:11:25 h) e estão listados na Tabela 1.

Na Figura 2, a cor azul clara representa a temperatura de entrada na coifa da água de refrigeração em °C, verde a temperatura de saída da água de refrigeração em °C, vermelho é a vazão de água de refrigeração c, azul escura a vazão LDG em Nm³/h, amarela a posição da válvula de sopro e roxo é a temperatura de saída do gás LDG °C.

O fluido considerado no domínio é o gás LDG. Na entrada, a vazão é 194.000 Nm³/h e a temperatura de 1.800°C. Nas paredes é considerado uma temperatura constante de 100°C baseado em medições por termografia realizadas em campo.

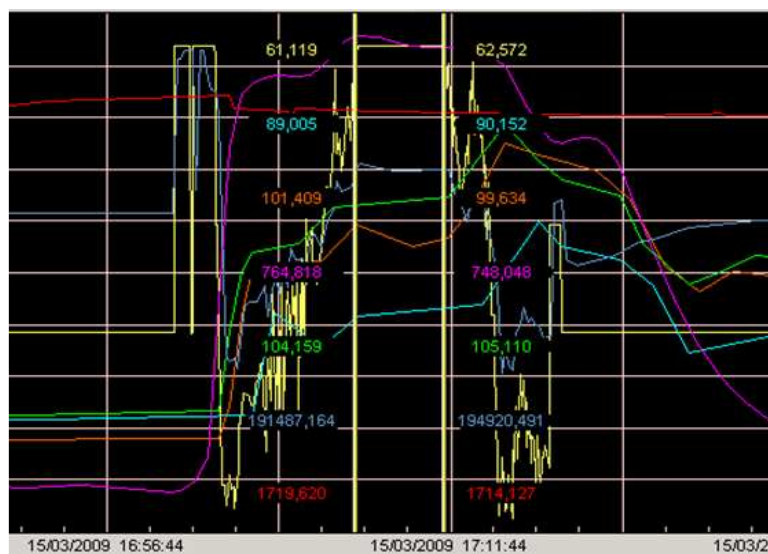


Figura 2 - Tela de interface do usuário do programa de monitoramento da AMT.

Tabela 1. Dados retirados do programa de monitoramento da aciaria da AMT

DADOS	VALOR
Temperatura de saída do LDG	748, 048 [°C]
Vazão de Gás LDG	194.929, 491 [Nm ³ /h]
Temperatura da água na entrada	90, 152 [°C]
Temperatura da água na saída	105, 110 [°C]
Vazão de água	1714, 127 [Nm ³ /h]

3 MÉTODO NUMÉRICO

As equações diferenciais parciais foram resolvidas através do método dos volumes finitos^(8,9) utilizando o pacote comercial ANSYS CFX 11. As equações foram discretizadas numa malha computacional não estruturada com 900.000 pontos nodais. O esquema de advecção foi o high resolution e o método iterativo para a solução do sistema linear de equações foi baseado na técnica multgrid.⁽¹⁰⁾ Como critério de convergência foi especificado um resíduo médio quadrático (RMS) das equações de conservação menor do que 10^{-4} .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações foram realizadas em processamento paralelo dividida em 16 núcleos de 3.2Ghz e com 64 GB de RAM disponível. Cada simulação teve um tempo de 29 horas de processamento. Todos os resíduos se mantiveram abaixo de 10^{-4} . Para validar os resultados, baseados nas condições de contorno extraídas de dados operacionais, é utilizado o valor da temperatura medido por um termopar na região próxima à saída da coifa. O termopar fica posicionado a 200 mm de distância da parede, exatamente onde esta o ponto azul localizado na Figura 3. O perfil de temperaturas calculado, mostrado na Figura 3, indica uma temperatura de 790°C nessa região, tal valor é 5% mais alto do que o valor efetivamente medido pelo termopar conforme observado na Tabela 1. Isso representa boa confiabilidade no modelo matemático, visto que, esse erro é aceitável para aplicações industriais.

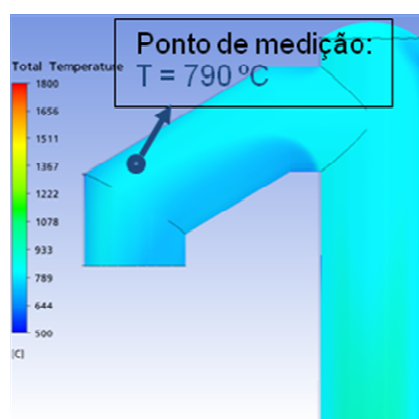


Figura 3 – Perfil de temperatura na região de saída da coifa.

A avaliação do campo de velocidades é relacionada com as treduas principais regiões de desgaste existentes. A Figura 4, mostra essas duas regiões. A região 1, é a superfície inferior da região inclinada da coifa e a região 2 é a superfície superior da curva de saída.

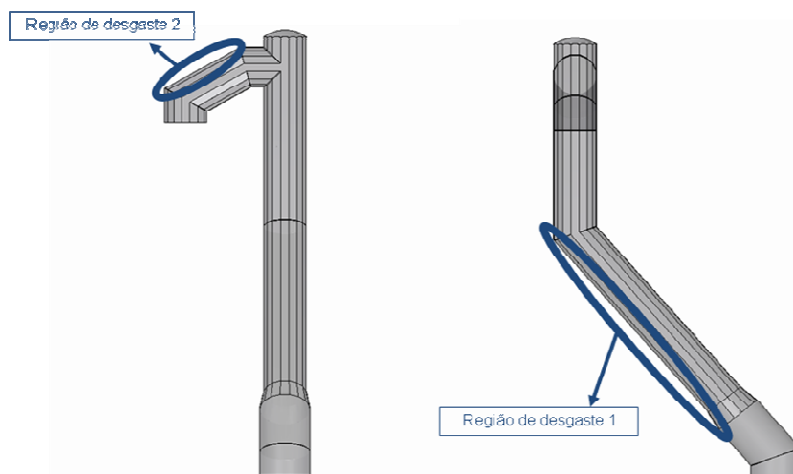


Figura 4 – Regiões de maior desgaste nas coifas dos convertedores 01 e 02.

Conforme apresentado na Figura 5, o escoamento ao longo da coifa tem velocidade máxima de 50 m/s na região da primeira curva de saída e na entrada encontra-se uma velocidade média de 36 m/s. Na primeira curva ocorre um descolamento do escoamento gerando uma região de recirculação. Com a redução do diâmetro entre a coifa móvel e fixa, o escoamento recola eliminando a recirculação, porém, mantém uma zona de baixa velocidade na região inferior da inclinação. Tal fato sugere que as partículas mais pesadas não sejam transportadas pelo gás devido a essa baixa velocidade, logo, elas caem e escorregam de volta para a entrada provocando um cisalhamento na parede localizada na região 1 de desgaste.

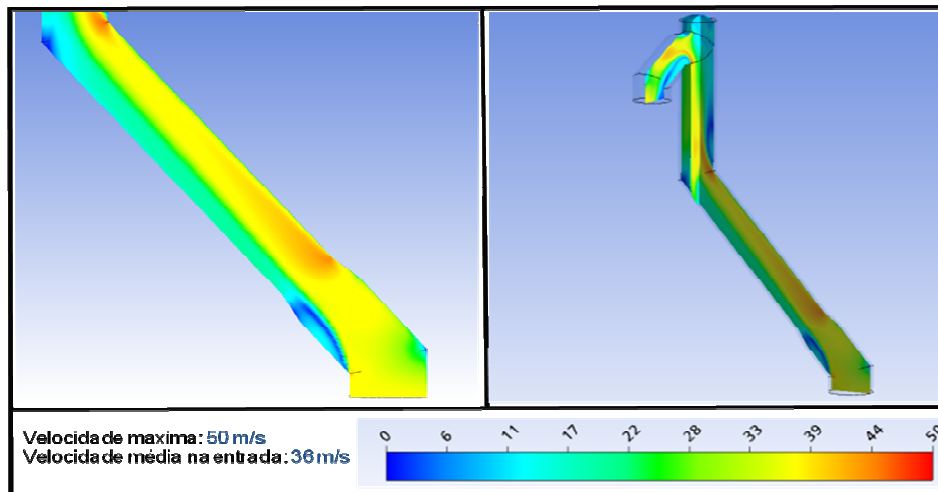


Figura 5 – Campo de velocidade na região central da inclinação da coifa do convertedor 01.

Na curva de saída, por ser acentuada, provoca uma projeção das partículas contra a parede posterior, pois a própria inércia das partículas não permite que as mesmas acompanhem o desvio da trajetória do fluxo, causando assim, grandes cisalhamento na região 2 de desgaste (Figura 6).

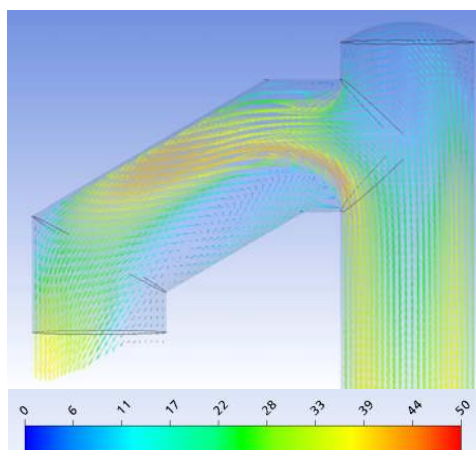


Figura 6 – Campo de velocidade na região central da curva de saída da coifa do convertedor 01.

Ao simular a geometria do convertedor 03 nas condições de operação do convertedor 01, as características do escoamento são similares. Por ter um diâmetro maior, a velocidade média na entrada é de 26 m/s e a velocidade máxima obtida chega a 30 m/s.

Na região de inclinação, a mesma recirculação devido a separação do escoamento na primeira curva é observada, mas como não há variação de diâmetro a recirculação se estende por toda a região inclinada o que sugere que o mesmo mecanismo de desgaste ocorra (Figura 7).

A curva de saída da geometria do convertedor 03 é mais acentuada em comparação ao convertedor 01 e conforme mostra a Figura 8, a projeção de material particulado na parede posterior deve ocorrer com o potencial de ter uma intensidade ainda maior. Tal fato pode não acontecer, pois como a velocidade de entrada é menor, a coifa do convertedor 03 pode exaurir menos material particulado do que a coifa do convertedor 01 que possui uma velocidade maior na entrada.

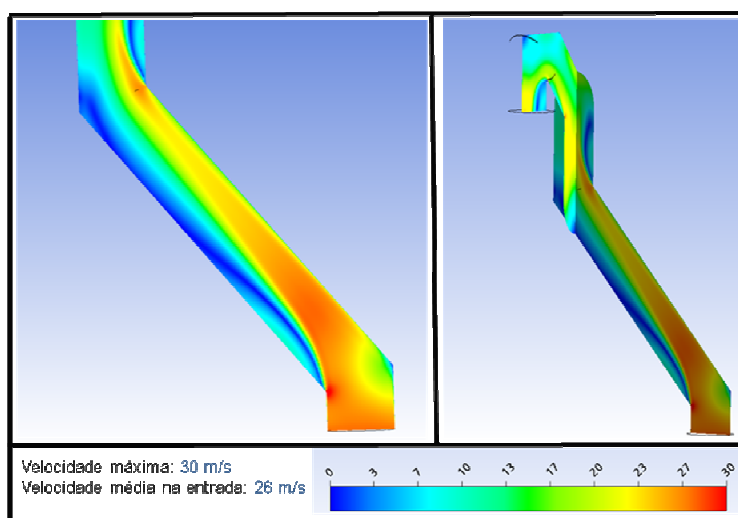


Figura 7 – Campo de velocidade na região central da inclinação da coifa do convertedor 03.

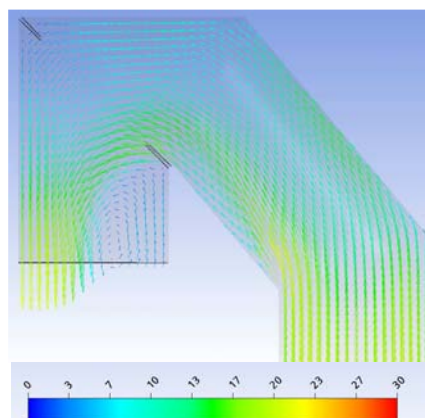


Figura 8 – Campo de velocidade na região central da curva de saída da coifa do convertedor 03.

5 CONCLUSÕES

Através da simulação fluidodinâmica, é possível compreender que as regiões mais críticas devido ao desgaste estão diretamente relacionadas às características do escoamento de cada região.

Conforme apresentado na análise do escoamento, pode-se inferir que há basicamente dois mecanismos de desgaste nas coifas. Um é de erosão devido ao contato de partículas em alta velocidade no sentido do fluxo de gás, e outro de abrasão, devido a decida de material mais pesado em baixa velocidade no sentido contrário ao fluxo de gás na região de desgaste 1.

O desgaste por erosão deve ser significativamente reduzido com o aumento do diâmetro das coifas, e a correspondente redução de velocidade do gás, e com uma possível aumento no raio de curvatura da região de saída.

Para a redução do desgaste abrasivo, deve-se avaliar a possibilidade de alterar a região de inclinação evitando a separação do escoamento e eliminando a zona de baixa velocidade. Também é importante investigar a utilização de materiais de alta resistência ao desgaste para revestimento das paredes.

Agradecimentos

À ArcelorMittal Tubarão pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Adams, R. W. **BOF Steelmaking** . 1974.
- 2 Odenthal, Hans-Jürgen, Jens Kempken, Jochen Schlüter, and William H. Emling. "**Advantageous Numerical Simulation of the Converter Blowing Process.**" Iron & Steel Technology, November 2007: 71-89.
- 3 Phillips, Duncan, and Carlos de Almeida. "**Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling In Prolonging Hood Life.**" AISE - Prolonging BOF Hood Life. Nashville, TN, 1998.
- 4 Furtado, R. G.; Costa, E. R.. **Simulação Computacional do Escoamento de Gases na Coifa da Aciaria da CST.** Monografia (Graduação em engenharia mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.



- 5 Pires. F. C.; **Simulação do escoamento na coifa de despoejamento primário do convertedor da aciaria da ArcelorMittal Tubarão utilizando CFD (computational fluid dynamics). Computacional do Escoamento de Gases na Coifa da Aciaria da CST.** Monografia (Graduação em engenharia mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.
- 6 Kato M, Launder B. E. The modeling of turbulent flow around stationary and vibratings square cylinders. 9TH Symposium on Turbulent Shear Flows. 10.4.1 – 10.4.
- 7 Galarça. M. M. **Transferência de calor combinando radiação e convecção no interior de dutos de geradores de vapor flamotubulares.** 2006. Dissertação Mestrado em engenharia mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- 8 Patankar, S. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.** USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- 9 Maliska, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.** Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2004.
- 10 ANSYS Inc. **ANSYS CFX Manual.** 2006.