



## MODELAGEM NUMÉRICA DO ESCOAMENTO NO INTERIOR DO SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO PRIMÁRIO DO CONVERTEDOR DA ARCELOR MITTAL JOÃO MONLEVADE<sup>1</sup>

Breno Totti Maia<sup>2</sup>  
Bruno Orlando de Almeida Santos<sup>3</sup>  
Fabricio Silveira Garajau<sup>4</sup>  
Hugo Leonardo de Freitas<sup>5</sup>  
Jose Geraldo Torres<sup>6</sup>  
Marcelo de Souza Lima Guerra<sup>4</sup>  
Rudolf Ruebner<sup>7</sup>

### Resumo

Neste trabalho foi desenvolvida uma análise do comportamento dos gases no sistema despoejamento primário do conversor BOF. A metodologia envolve CFD para simular a temperatura, velocidade de gases de combustão para os sistemas multi fases, incluindo partículas sólidas. Foi investigada a influência do ar na temperatura, fluxo e análises de gás ao longo do sistema de despoejamento e sua influência na refrigeração dos tubos. Os dados numéricos foram validados com valores reais de processo. O próximo passo a execução de modificações na geometria dos dutos com objetivo de encontrar a situação mais estável para o equipamento. O melhor resultado foi aumento do diâmetro e geometrias suave nas curvas.

**Palavras-chave:** Convertedor; Despoejamento primário; CFD.

### NUMERICAL MODELING OF FLOW INTO PRIMARY DEDUSTING SYSTEM OF CONVERTER ARCELOR MITTAL JOÃO MONLEVADE

### Abstract

In this work was developed an analysis of gases behavior into primary dedusting system of BOF converter. The methodology involves CFD to simulate velocity, temperature to gases in combustion for multi phases systems including solid particules. It was investigated the influence of the air in the flow, temperature and gas analyses along of the dedusting system and the influence in cooling pipes. Numerical data were validated with real values of the process. The next step was the implementation of changes in the geometry of the ducts in order to find a more stable situation for the equipment. The best result was increase diameter and smooth geometries in curves.

**Key words:** Supersonic; CFD; Pressure; Compressible gas.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista e Pesquisador da Lumar Metals, sócio da ABM,

<sup>3</sup> Engenheiro de Materiais e Pesquisador da Lumar Metals, sócio da ABM,

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico e Pesquisador da Lumar Metals, sócio da ABM,

<sup>5</sup> Engenheiro de Manutenção da ArcelorMittal Monlevade, sócio da ABM,

<sup>6</sup> Coordenador Técnico de Manutenção da ArcelorMittal Monlevade,

<sup>7</sup> Engenheiro Mecânico Doutor e Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG,



## 1 INTRODUÇÃO

O sistema de despoeiramento é um equipamento destinado ao controle da poluição do ar cuja função é de captar, conduzir e separar as partículas sólidas presentes nos gases gerados. Em linhas gerais podem ser divididos em duas classes principais: sistemas úmidos e sistemas secos. Nos conversores LD da ArcelorMittal Monlevade existem dois tipos de sistema despoeiramento complementares, um sistema denominado primário (sistema úmido) e outro denominado secundário (sistema seco).

O sistema primário é responsável por coletar os gases e fumos provenientes do processo do sopro de oxigênio no banho metálico, enquanto que o sistema secundário é responsável por coletar os gases e fumos resultantes do processo de carregamento de gusa líquido e sucata no conversor.<sup>(1)</sup> Como objeto de estudo deste trabalho será detalhado o sistema de despoeiramento primário instalado na aciaria da ArcelorMittal Monlevade.

Nos sistemas úmidos os gases são parcialmente resfriados pelos dutos refrigerados e em seguida passam a sofrer lavagens, normalmente duas, para remoção do material particulado. A primeira lavagem tem o objetivo de remover a maior quantidade de partículas enquanto a segunda lavagem tem o objetivo de garantir os limites determinados pela legislação ambiental.<sup>(2)</sup>

Os gases saem do conversor com temperatura de aproximadamente 1.700°C arrastando grande quantidade de partículas sólidas como FeO, escória, CaO, etc. Estes gases então entram em um sistema de chaminé e coifa refrigerados logo acima do conversor juntamente com uma pequena quantidade de ar.

A entrada de ar no sistema é restringida pela saia móvel, que é fixada por quatro cilindros hidráulicos ao sistema da coifa. A saia é abaixada durante a operação de sopro para reduzir a distância entre o conversor e a coifa, minimizando assim a entrada de ar. Antes de o gás ser limpo, ele deve ser resfriado a uma temperatura de aproximadamente 900°C no sistema de coifa e chaminé refrigerada.

O sistema de coifa e chaminé refrigerada é formado por feixes tubos soldados entre si, por onde circula água de refrigeração do sistema e o excesso da quantidade de calor dos gases entre a boca do vaso e a entrada do lavador é transmitido por radiação e convecção através desta parede de tubos.

A água de refrigeração é bombeada para o sistema em um circuito fechado e pressurizado. O calor retirado dos gases é dissipado para o ar em trocadores de calor, o circuito possui ainda um tanque de armazenagem pressurizado com nitrogênio a fim de manter a pressão constante do sistema bem como equalizar a transferência de calor durante os ciclos do processo.<sup>(2)</sup>

A capacidade de exaustão é determinada pela capacidade do ventilador e as respectivas perdas de carga no circuito, parâmetro importante a ser considerado como possíveis desvios operacionais garantindo um excedente de vazão na capacidade de exaustão.

O sistema de dutos refrigerados tem como principal função durante o processo de transferência de calor a redução volumétrica dos gases, através do efeito de contração térmica. Durante a passagem do gás e particulados, o contato com os dutos refrigerados promove a troca de calor por convecção na parede dos tubos. A troca eficiente de calor é função da correta vazão de água nos tubos, controle da temperatura da água na entrada e na saída do sistema, pressão e contrapressão presente no circuito de água bem como o controle da qualidade desta. Por sua vez, um correto dimensionamento dos dutos garante um tempo adequado de residência



do gás em seu interior de modo a favorecer o contato gás-parede do tubo maximizando a troca térmica.<sup>(3)</sup>

Outro fator importante nesta primeira etapa do despoeiramento a úmido é uma avaliação criteriosa da geometria dos dutos. De maneira geral o gás deve ter um fluxo uniforme ao longo do trecho refrigerado.<sup>(4,5)</sup>

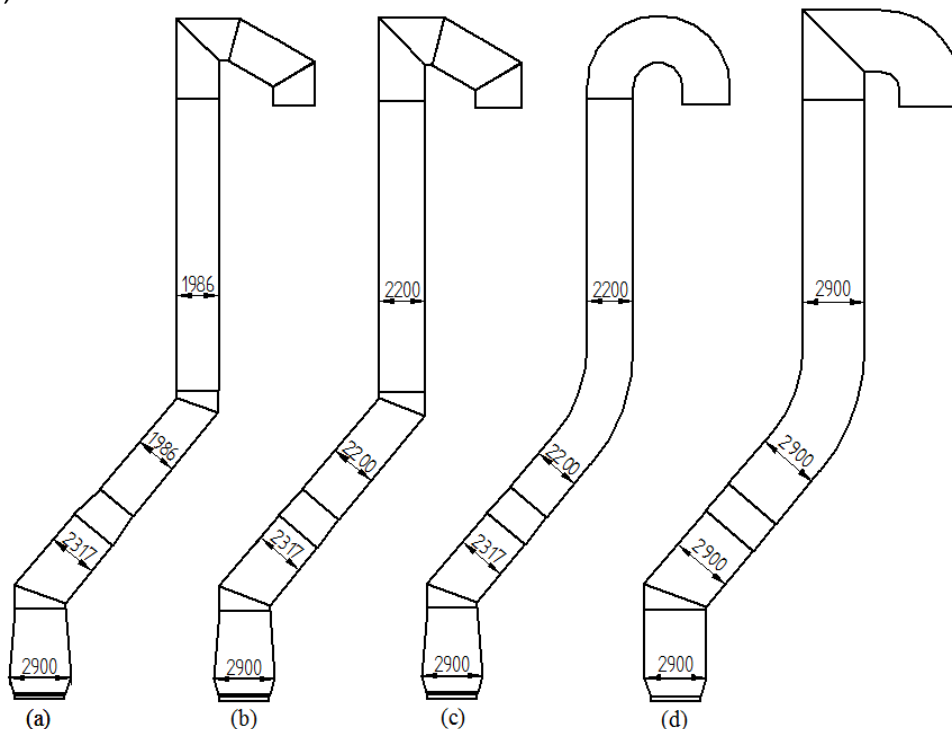
Os métodos computacionais de cálculos numéricos são ferramentas que permitem uma análise criteriosa dos parâmetros citados proporcionando a identificação de problemas no equipamento ainda na fase de projeto ou durante o seu período de operação auxiliando a área de manutenção na identificação das possíveis fontes causadoras de problemas para, bem como as soluções mais adequadas.<sup>(6-8)</sup>

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo utilizar o método de volumes finitos para estudar a influência da variação do diâmetro do sistema de despoeiramento do convertedor LD da Usina da ArcelorMittal em João Monlevade na condição de escoamento e temperatura do gás, bem como a influência das partículas no desgaste dos tubos refrigerados.

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

A análise computacional do sistema do despoeiramento deste trabalho se dividiu em quatro partes. A primeira simulação se baseou em dados do equipamento atualmente em operação. A segunda simulação mostra um ligeiro aumento do diâmetro interno de passagem dos gases, partindo de 1.986 mm do sistema atual para 2.200 mm. Alterações nas curvas foram introduzidas na terceira simulação, sendo a maior mudança na curva acentuada localizada no topo do despoeiramento. A quarta opção foi atribuída a uma extrapolação das dimensões para 2.900 mm (Figura 1).



**Figura 1.** Dimensões do sistema de despoeiramento, (a) sistema atual; (b) sistema alterado 1; (c) sistema alterado 2; e (d) sistema extrapolado.



Foi realizada uma simulação comparativa da troca térmica e tensões entre tubos, considerando ou não a existência de uma barra separadora entre tubos.

Para uma boa aproximação dos resultados da simulação computacional com as informações coletadas na área, utilizou-se uma adaptação da geometria, para uma malha não-estruturada favorável para o acompanhamento das partículas através da descrição Lagrangeana, ou seja, o acompanhamento individual considerando a gravidade, a força de arraste e a dispersão turbulenta.

As condições de contorno foram ajustadas com as informações coletadas na área. No sistema atualmente instalado foram consideradas duas variações de altura da coifa móvel, sendo a primeira totalmente fechada e a segunda com 100 mm de abertura. Uma simulação secundária foi realizada para o sistema de refrigeração. Através dessa simulação foi estabelecido um decréscimo da temperatura de superfície interna da parede linearmente através da Equação 1, responsável pela refrigeração do gás em função de sua velocidade interna.

$$T = \left( \frac{T_{\min} - T_{\max}}{L} \right) \cdot X + T_{\max} \quad (1)$$

Onde:  $T_{\max}$  é a temperatura máxima da parede;  $T_{\min}$  é a temperatura mínima;  $L$  é o comprimento total do equipamento; e  $X$  a posição cartesiana. Na Entrada foi utilizada uma vazão de gás de 3.660 Nm<sup>3</sup>/min a uma temperatura de entrada de 1.700°C. A pressão na saída foi estabelecida em 2.500 mmCA.

Para a simulação com a saia totalmente fechada não há captação do ar ambiente, ou seja, apenas o gás interno é escoado através do sistema de despoeiramento. Já quando se utiliza a saia aberta a condição de 1atm e temperatura de 40°C é utilizada para avaliar seu efeito no perfil de velocidade e temperatura. A Tabela 1 apresenta os principais dados utilizados para a simulação. Para combustão foi utilizado um fator de inflamabilidade de 0,42. Este fator limita a estequiometria das equações e proporciona a adequação das temperaturas de chama.

**Tabela 1.** Condições de contorno

	Unidade	Saia Fechada	Saia 100 mm
Vazão Gás	[Nm <sup>3</sup> /min]	3.660	3.660
Vazão Particulados	[kg/s]	1,69	1,69
Ø Partículas	[µm]	100	100
Tem. Gases	[°C]	1.700	1.700
Pressão Saia	[atm]	1	1
Temp. Ambiente	[°C]	-	40
Pressão Saída	[mmCA]	2.500	2.500
Água Refrigeração	[°C]	80	80
Rugosidade tubos	[µm]	0,045	0,045

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações computacionais, devidamente separadas em duas partes. A primeira parte cuida da apresentação dos resultados das simulações realizadas no equipamento com a saia totalmente abaixada. A segunda parte apresenta os resultados das simulações com uma abertura na saia de 100 mm.



## 4.1 Escoamento com Capuz Fechado

Os resultados das simulações numéricas utilizando o capuz móvel fechado mostrou que a variação do perfil de temperatura ao longo dos dutos e no topo do sistema de despoejamento tem mesmo comportamento (Figura 2).

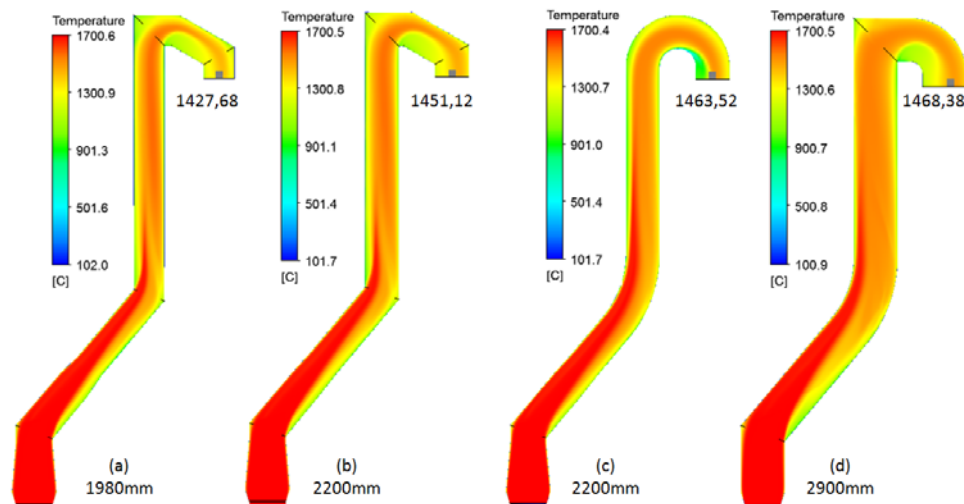


Figura 2. Perfis de temperatura dos diferentes diâmetros de tubulação.

Para uma mesma condição de abertura, a fonte energia programada no CFD é igual para os quatro casos, sendo uma das prerrogativas o fechamento dos balanços para convergência. O perfil de temperatura tem variações pequenas em função apenas da geometria, mas via de regra, houve uma compensação entre o aumento do diâmetro do duto e a redução da velocidade do gás, considerando uma capacidade de exaustão fixa. Pelo coeficiente de transferência de calor por convecção do gás, à medida que a velocidade do gás diminui, diminui também seu poder convectivo, impactando na sua capacidade de refrigeração. Para um sistema totalmente fechado, o impacto é pequeno na temperatura final de topo.

Na prática operacional não ocorre uma vedação total, favorecendo pequenas infiltrações de ar, o oxigênio presente no ar reage com o CO gerado no conversor formando o CO<sub>2</sub>, enquanto o N<sub>2</sub>, que é um gás inerte e de maior proporção, promove a redução na temperatura do gás.

Ainda na Figura 2 nota-se como o escoamento do fluido provoca alterações nos campos temperatura, mostrando que atenção adequada deve ser dada para a refrigeração do capuz, coifa móvel e parte superior do trecho a 45°.

A velocidade de escoamento em sistema totalmente fechado mostra que o diâmetro do tubo tem forte influência na sua velocidade. A Figura 3 mostra os diferentes perfis de velocidade ao longo dos circuitos refrigerados. É possível observar que para o circuito atual (Figura 3a), o rápido afunilamento do diâmetro interno provoca um aumento repentino na velocidade do gás. Esse aumento impacta diretamente na curva de 180° no topo da tubulação, o que pode acelerar seu desgaste. Ao diminuir o grau de afunilamento do tubo (Figura 3b), a velocidade média diminui consideravelmente, com menor turbulência na curva de 180° no topo do circuito.

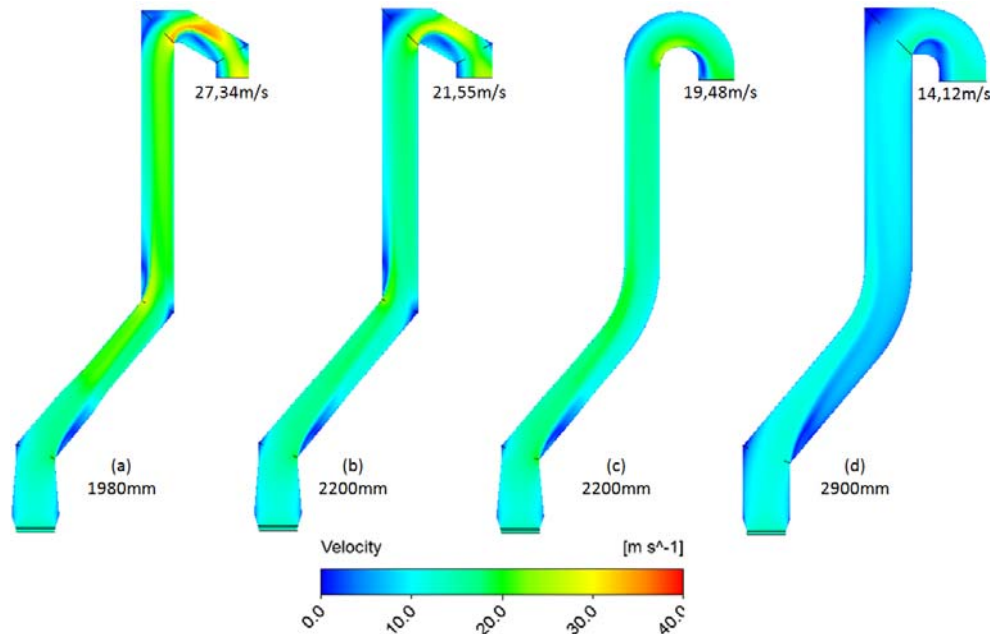


Figura 3. Perfis de velocidade dos diferentes projetos.

A maior diferença entre os perfis de velocidade é devido ao perfil da curva de 180° no topo do equipamento. Quando uma curva suave é implementada é possível notar (Figura 3c), que a velocidade na curva diminui significadamente quando comparado com os outros dois modelos. Esse perfil foi desenhado acompanhando o sentido do escoamento, diminuindo o volume pistonado gerado após a curva e tornando a transição para a descida do gás mais suave. O quarto e último perfil foi modelado com suas dimensões extrapoladas para 2.900 mm de diâmetro interno.

A maior diferença entre os perfis de velocidade pode ser visto em cortes em determinadas alturas do equipamento, mostrando como se comporta a velocidade próxima à parede do duto. A Figura 4 mostra claramente que, em um corte a 25.000 mm da boca do convertedor, o aumento do diâmetro interno impacta favoravelmente na superfície da tubulação de refrigeração.

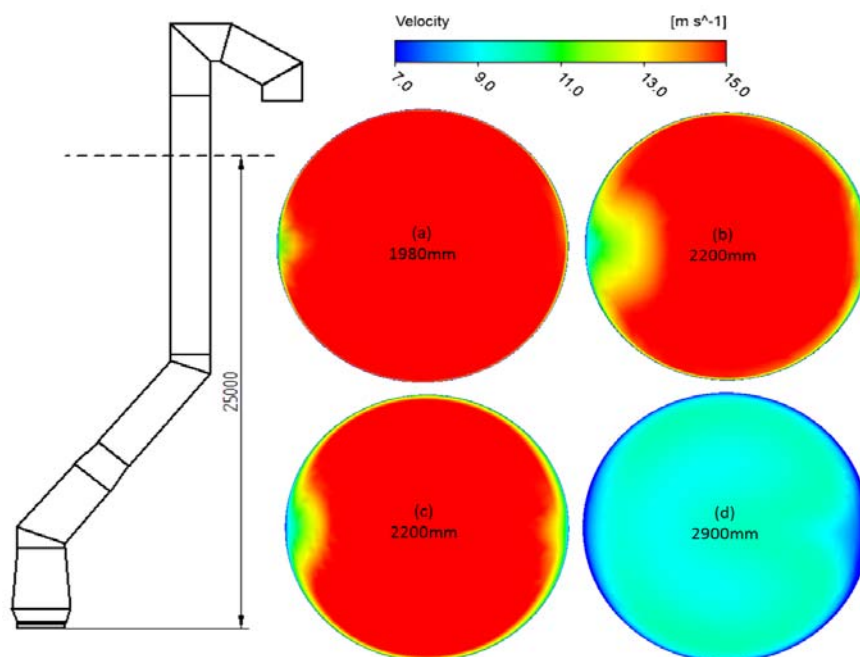


Figura 4. Perfis de velocidade em corte a 25.000 mm acima da boca do convertedor.



Já através Figura 4 é possível observar com maiores detalhes o perfil de velocidade na parede dos dutos. Para uma mesma escala de tamanho e velocidade, observa-se que, na Figura 5a a velocidade próxima à parede é muito maior que nos outros perfis.

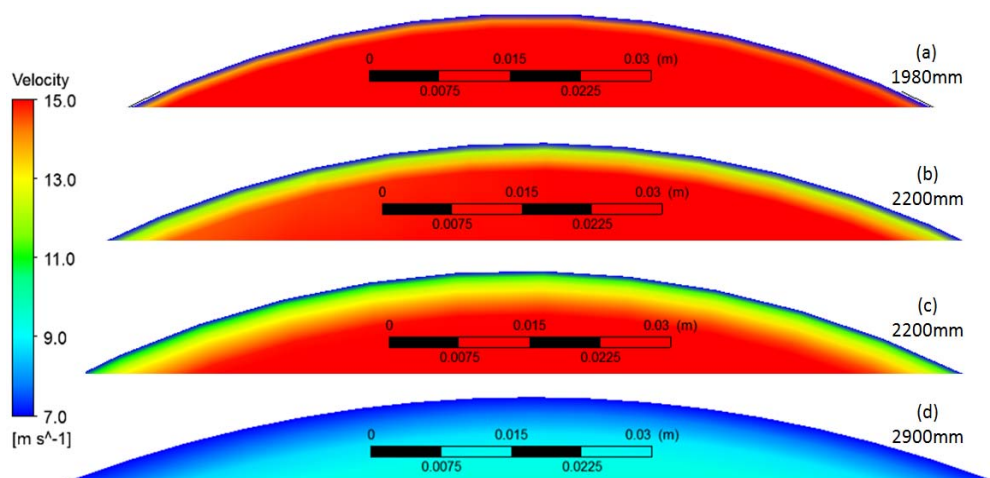


Figura 5. Detalhe dos perfis de velocidade na parede da tubulação.

O mesmo ocorre quando se analisa um corte a 14.500 mm da boca do conversor, posição esta ligeiramente acima da segunda curva de 45°, onde é possível verificar que os perfis de velocidade próximo a parede dos dutos se repetem.

A velocidade do gás influencia diretamente no impacto das partículas na superfície do tubo. Como o gás arrasta as partículas para o sistema de lavagem, já era esperado que à medida que a velocidade do gás diminui, também diminua a velocidade das partículas carregadas. A Figura 6 mostra o caminho das partículas monitorada pelo método de discretização Lagrangeana. Para uma vazão constante de partículas igual para todos os quatro modelos, é possível observar que o local de impacto das partículas é o mesmo, porém a intensidade muda conforme a velocidade de impacto.

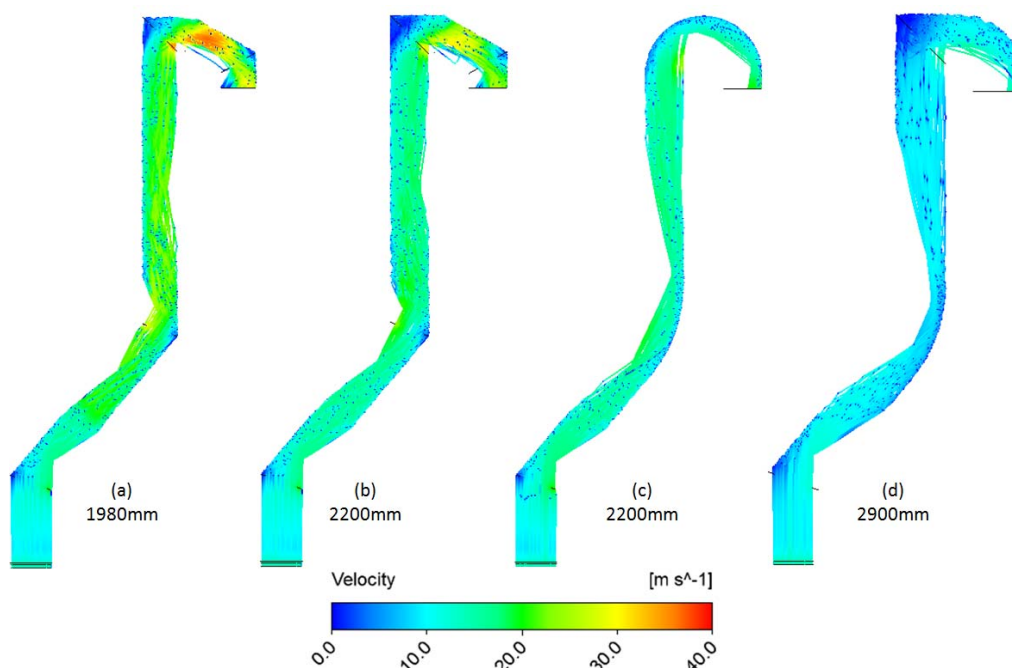
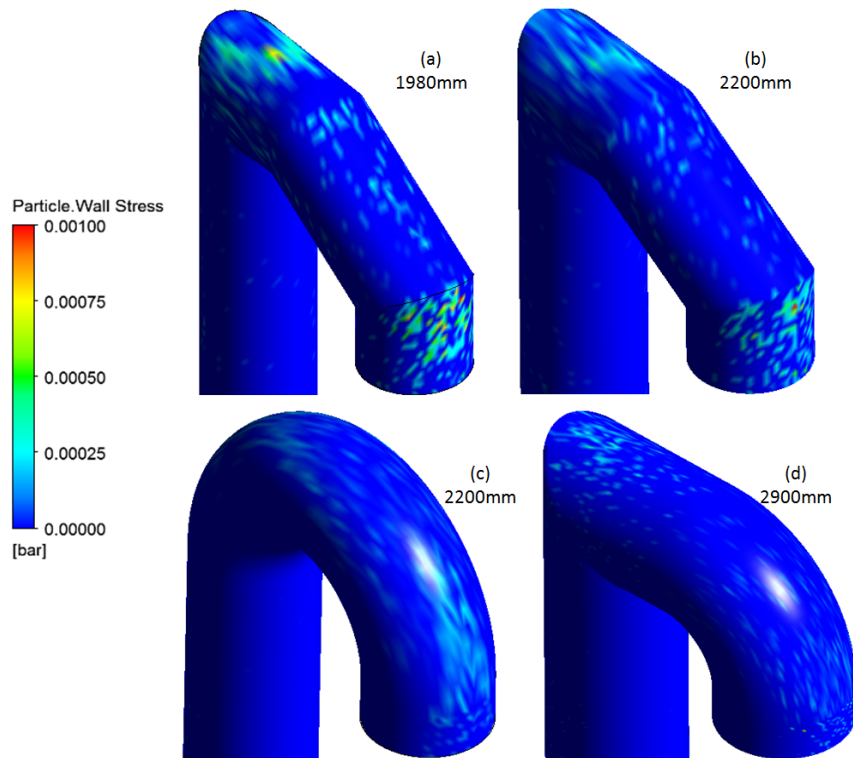


Figura 6. Avaliação do monitoramento das partículas nos diversos perfis de tubulação.



**Figura 7.** Efeito do impacto do material particulado nas paredes do duto refrigerado.

A Figura 7 mostra o efeito do impacto das partículas na superfície dos tubos com maior detalhe e em mesma escala para melhor comparação. Quando compara-se a tensão gerada pelo impacto das partículas nos quatro perfis em mesma escala, obtem-se melhor avaliação para o sistema totalmente fechado. Fica evidenciado o ganho com a suavização da curva de 180° no topo do equipamento.

O perfil (c) mostrado na Figura 7 fica mais evidenciado quando comparado com o perfil (b) de mesmo diâmetro interno (2.200 mm). É possível observar que, para as mesmas medidas internas, o impacto das partículas é diminuído apenas pela suavização das curvas. Para um sistema totalmente fechado, o perfil de curvas suavizadas (c) se mostrou melhor quando comparado com o perfil (b), que se limita apenas no aumento do diâmetro interno do conjunto original. O impacto das partículas no perfil (d) também se mostrou vantajoso, como esperado.

## 4.2 escoamento com Capuz Aberto

Com a abertura do capuz ocorre a admissão de ar do ambiente externo. O ar contribui para combustão ao longo do duto modificando a composição do gás e a temperatura ao longo do duto (Figura 8).



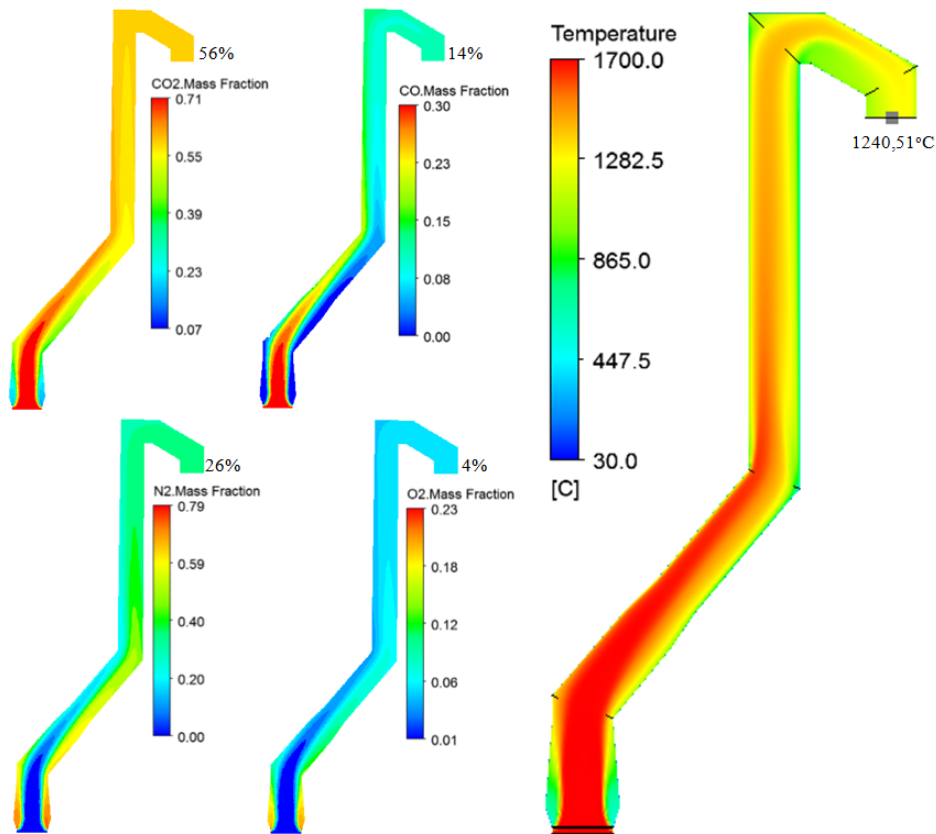


Figura 8. Variação da composição dos gases durante combustão ao longo do duto.

O ar ambiente mais denso pressiona os gases do convertedor para o centro. Ao longo do duto o oxigênio do ar reage com o monóxido de carbono, aumentando a concentração de dióxido na saída do duto refrigerado assim como também aumenta a temperatura na saída. A concentração média dos gases de saída é compatível com valores encontrados na indústria durante o período de máxima descarburização.

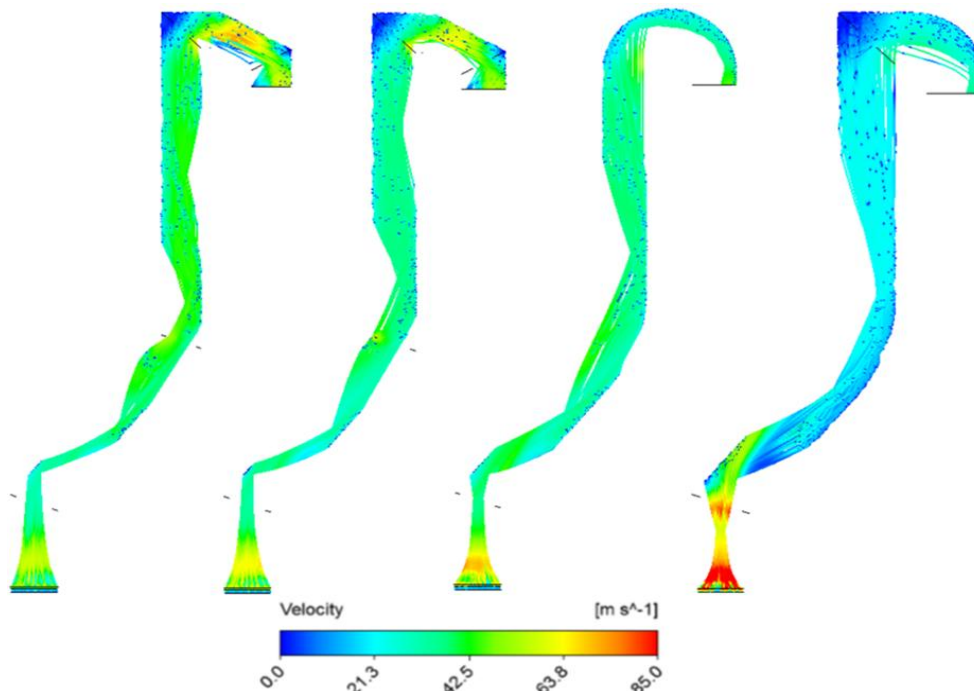


Figura 9. Trajetória das partículas ao longo do duto.



Comparando a Figura 9 com a Figura 6 é possível notar que o ar ambiente mais denso comprime os gases do convertedor para o centro, formando um funil. Com a mudança de inclinação dos dutos e a centralização do fluxo gasoso, a colisão das partículas é intensificada em regiões específicas da coifa e enfatizadas na Figura 10.

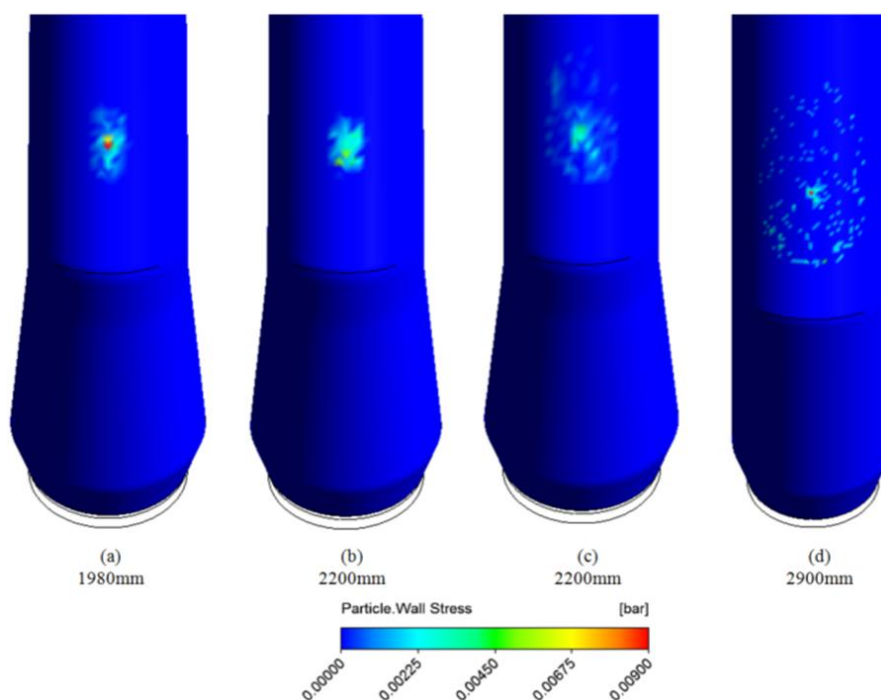


Figura 10. Impacto das partículas na primeira curva do despoeiramento.

O impacto das partículas é agravado também pela temperatura elevada na mesma região. Os resultados desta análise coincidem com os efeitos sofridos na rotina operacional.

## 5 CONCLUSÃO

As principais conclusões do trabalho são:

1. Para sistema fechado o aumento do diâmetro, reduz a velocidade dos gases, aumentando a camada limite e reduzindo a troca térmica com o sistema refrigerado;
2. para sistema aberto ocorre aumento de temperatura em função da pós-combustão ao longo do duto;
3. o aumento do diâmetro do duto, reduz a velocidade dos gases, reduzindo as regiões de impacto de partículas sólidas;
4. em sistema aberto, o ar atmosférico de alta densidade comprime os gases vindos do interior do convertedor, concentrando as áreas de impacto de gases na tubulação; e
5. o CFD apresentou uma análise de gás após combustão compatível com valores industriais durante o período de descarburização.

## Agradecimentos

Os componentes do trabalho agradecem a equipe da ArcelorMittal João Monlevade pelo trabalho de validação dos resultados e a Lumar Metals pelo incentivo a pesquisa continuada.



## REFERÊNCIAS

- 1 SCHNELLE, KARL B., BROWN, CHARLES A., Air Pollution Control Technology Handbook. CCR Press, 2001.
- 2 Manual do sistema Baunco
- 3 KERRY, FRANK G., Industrial Gas Handbook : Gas Separation and Purification. CCR Press, 2006.
- 4 SHAPIRO, H. N., MORAM, M. J., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. New York: John Wiley & Sons, 1988. P.417-435.
- 5 PERRY, ROBERT H., GREEN, DON W., Perry's Chemical Engineers Handbook. McGraw-Hill, 1997.
- 6 Innovative Turbulence Modeling: SST Model in ANSYS CFX. TECHNICAL BRIEF ANSYS. Disponível em: <<http://www.ansys.com>>. Acesso em: 29 dec. 2006.
- 7 ANSYS FLUENT “*FLUENT User’s Guide*”, 2005.
- 8 MALISKA, C. R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional – Fundamentos e Coordenadas Generalizadas*. LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1995, Rio de Janeiro, RJ.