

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FILIPPE CARVALHO PIRES

**SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO NA COIFA DE
DESPOEIRAMENTO PRIMÁRIO DO CONVERTEDOR DA
ACIARIA DA ARCELORMITTAL TUBARÃO UTILIZANDO
CFD (*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*)**

Vitória

2009

FILIPE CARVALHO PIRES

**SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO NA COIFA DE
DESPOEIRAMENTO PRIMÁRIO DO CONVERTEDOR DA
ACIARIA DA ARCELORMITTAL TUBARÃO UTILIZANDO
CFD (*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*)**

Trabalho acadêmico apresentado ao Centro de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção da graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Luís Teixeira.

Co-Orientador: MSc. Rafael Sartim

Vitória

2009

FILIPE CARVALHO PIRES

**SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO NA COIFA DE
DESPOEIRAMENTO PRIMÁRIO DO CONVERTEDOR DA
ACIARIA DA ARCELORMITTAL TUBARÃO UTILIZANDO
CFD (*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*)**

COMISSÃO EXAMINADORA

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me criou e amou a tal ponto de ter mandado seu único filho Jesus para que eu tenha uma vida eterna. Aos meus pais, que com amor lutaram para que eu pudesse chegar aqui. Aos meus irmãos que nas horas difíceis me ajudaram lutar pelos meus sonhos. Ao Engenheiro MSc. Rafael Sartim, que concedeu horas de seu lazer em eternas simulações e investiu tempo e dedicação neste projeto. Ao Engenheiro Especialista Vladimir Rangel Zanetti, dedicando várias horas para me ensinar um pouco do muito conhecimento nestas áreas. Ao meu orientador Dr. Rafael Luiz Teixeira, que muito me ajudou neste projeto. Aos Engenheiros Sérgio Mattedi, meu coordenador, Antônio Luiz Baldon, gerente da IUM, meus colegas e amigos aos que me deram todo o apoio e confiança neste projeto.

A ArcelorMittal Tubarão e funcionários, que viabilizaram e deram total apoio na realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho é analisado o escoamento de gás de na coifa de despoeiramento primário do convertedor da aciaria da siderúrgica ArcelorMittal Tubarão. Motivado pelo histórico de falhas fornecido pela equipe de manutenção da coifa, é gerado um modelo de simulação computacional para melhor compreensão do perfil do campo de velocidades. Para este estudo foram utilizados os códigos computacionais contidos no ANSYS CFX e o gerador de malha ICEM CFD.

No Capítulo 1 é explicado brevemente o processo siderúrgico dando ênfase ao processo de produção de aço e sistema de despoeiramento instalado na ArcelorMittal Tubarão. Neste capítulo é apresentada também a revisão bibliográfica e o estado da arte.

No Capítulo 2 é apresentada a modelagem matemática das equações que governam os fenômenos de transporte para este caso. Inicialmente são abordadas as equações gerais de quantidade de movimento, da continuidade e na conservação de energia para um volume de controle. São também abordadas as condições de contorno e é adicionado o termo de viscosidade turbulenta e os critérios de convergência utilizados no presente estudo.

No Capítulo 3 são apresentados os resultados dos dois estudos presentes neste trabalho, sendo eles a análise do perfil dos campos de velocidade utilizando determinadas condições de contorno e a comparação deste perfil com outro obtido considerando a variação da energia do gás.

No Capítulo 4 são apresentadas as conclusões obtidas após análise de resultados, são sugeridas suposições sobre a relevância das simplificações adotadas no Capítulo 2 para este trabalho e são feitas recomendações para trabalhos futuros, para que com base nestas, possa haver uma maior evolução em trabalhos posteriores.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação randômica da distribuição da propriedade U_i	8
Figura 2 - Tela de interface do usuário do programa de monitoramento da AMT(2009).....	12
Figura 3 - Comparativo da geometria da superfície da coifa computacional e real.	13
Figura 4: Esquema mostrando conversor em funcionamento e reações que ocorrem.	14
Figura 5 – Gráficos de propriedades do gás LDG.	15
Figura 6 - Superfície de um volume finito.	17
Figura 7 - Demonstrativo de 3 diferentes malhas na superfície de entrada da coifa móvel....	20
Figura 8 - Gráfico exibindo a diferença das velocidades em 3 diferentes malhas em 4 seções.	20
Figura 9 - Vetores velocidade na região da coifa móvel após curva(a) e com imagem ampliada(b).....	22
Figura 10 - Linhas de corrente(a) e perfil de velocidade (b) na coifa móvel antes do difusor.	22
Figura 11 – Demonstração de velocidade em plano perpendicular ao fluxo no início da rampa(a) e vista lateral(b). Seções de A à G.	23
Figura 12 - Vetores velocidade da coifa fixa na seção HL(a) na parte externa(b) e interna(c) da curva.....	24
Figura 13 – Demonstração da velocidade na coifa fixa após curva na seção QRS: Vista lateral (a); Vista Isométrica(b).....	24
Figura 14 – Cisalhamento entre a parede e o fluido(a) e linhas de corrente em vista Isométrica(b) na coifa fixa após curva na seção QRS.	25
Figura 15 – Demonstração da velocidade na saída da coifa fixa com condição <i>opening</i> : Vista lateral (a); Vista Isométrica(b).....	Erro! Indicador não definido.
Figura 16 - Comparativo de velocidades sem e com troca térmica na seção x-z. (a) caso 1 e (b) caso 2.	26
Figura 17 – Comparativo de velocidades na seção x-z. (a) Caso 1 e (b) Caso 2.....	27
Figura B. 1 - Sistema de resfriamento de gases demonstrando informações de setores e pontos de referência para o trabalho. As linhas tracejadas são as linhas onde foram gerados os perfis de velocidade para comparação entre as três malhas testadas.....	39
Figura B. 2 - Sistema de resfriamento de gases e conversor..	Erro! Indicador não definido.
Figura B. 3 - Esquema de divisão em seções da coifa fixa.	41
Figura B. 4 - Esquema de identificação dos tubos de refrigeração da coifa fixa.	41
Figura B. 5 - Termografia realizada no dia 31/07/2007 às 15h na coifa móvel e fixa do conversor 1.	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. METODOLOGIA	5
2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA	5
2.1.1 Equações governantes	5
2.1.2 Modelos de turbulência	7
2.1.3 Condições de contorno.....	11
2.1.4 Critério de convergência	16
2.2 MODELAGEM NUMÉRICA.....	16
2.2.1 Método dos volumes finitos	17
2.2.2 Esquema de advecção.....	18
2.2.3 Solução do sistema linear de equações.....	18
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
3.1 MALHA UTILIZADA.....	19
3.2 AVALIAÇÃO DE RESULTADOS.....	21
3.2.1 Primeiro Estudo.....	21
3.2.2 Segundo Estudo.....	26
4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	29
4.1 CONCLUSÕES	29
4.2 CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	31
5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	33
ANEXO A - PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO.....	35
A.1 FLUXO PRODUTIVO DA SIDERURGIA.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
A.2 ACIARIA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
ANEXO B - DESCRIÇÃO DA COIFA DE DESPOEIRAMENTO	
PRIMÁRIO.....	38
B.1 SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE GASES.....	38

1. INTRODUÇÃO

No processo siderúrgico, o ferro gusa produzido nos Alto-Fornos é transportados para fornos, comumente conhecidos como convertedores, para ser transformado em aço líquido. O convertedor Forno de Oxigênio Básico, do inglês *Basic Oxygen Furnance* (BOF) conhecido como LD em homenagem às cidades da Áustria, Linz e Donawitz, onde foi testado pela primeira vez (Adams, 1974), baseia-se na injeção de um jato de oxigênio no banho através de uma lança, para oxidação do ferro gusa. A função desta oxidação é ajudar a remover elementos secundários contidos no banho tais como: carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre. Uma mistura mais eficiente pode ser obtida pela injeção de um gás inerte, nitrogênio ou argônio, pelo fundo do convertedor. Os gases injetados, 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. As principais atribuições da coifa são: garantir a coleta dos gases, fornecer uma câmara para a combustão parcial ou total desses gases, refrigerar os gases até uma temperatura aceitável para o encaminhamento destes ao sistema de controle ambiental. Mais informações sobre o processo siderúrgico pode ser consultado no Anexo A.

As paradas de produção por intervenções de manutenção geram um alto custo na produção de aço, pois além do volume de aço que deixa de ser produzido, existe ainda o alto custo da manutenção. Na execução da manutenção existem gastos com mão de obra, compra e/ou aluguel de ferramentas e equipamentos e o próprio valor da peça que está sendo trocada ou reparada. O principal componente que gera paradas de produção e intervenções de manutenção de convertedores são os reparos e/ou trocas das paredes da coifa do despoeiramento primário.

Coifas de despoeiramento primário de convertedores BOF estão sujeitos a inúmeros problemas causados pelas condições de operação as quais são submetidas e estão detalhadas no anexo B. Os principais fatores que causam falhas em coifas de despoeiramento de convertedores, em geral, estão divididos em duas categorias (Phillips e Almeida 1998): (i) ineficiência da refrigeração dos tubos da parede, e (ii) tensões nas paredes das coifas.

- (i) A primeira categoria de falha está associada à quantidade e qualidade da água de resfriamento, que é proporcionado pela falta de refrigeração dos tubos. As falhas podem ocorrer caso não haja transferência de calor suficiente, em cada tubo de refrigeração, tal que esta possa remover a quantidade de calor necessária para resfriamento da parede metálica. Esse problema pode ocorrer devido a uma baixa vazão, distribuição inadequada de água ou obstrução nos tubos de refrigeração, que pode ser identificado pela termografia mostrada na Figura B.4 do Anexo B.
- (ii) A segunda categoria se enquadra nas condições mais severas as quais uma coifa de despoeiramento primário está submetida (Adams 1974). Nesta categoria estão inclusos: corrosão, tensões térmicas e erosão. A corrosão é um processo químico que ocorre nas paredes metálicas da coifa devido à reação de oxidação, o que contribui para diminuição de espessura dos tubos. As tensões térmicas são geradas pelo resfriamento e aquecimento das paredes durante os ciclos de operação, ou corridas, dos convertedores BOF. As tensões provocam fadiga térmica no material da parede provocando trincas e rupturas no metal. A erosão é causada pela colisão do material particulado, que está presente no gás exaurido do convertedor durante o processo de sopro de oxigênio, com as paredes da coifa. O desgaste provocado tem grande contribuição nos problemas de falhas na tubulação.

Com intuito de se reduzir o custo de manutenção e ampliar o desempenho dos equipamentos que compõe os convertedores BOF, muitos estudos têm sido realizados, com propostas específicas sobre a compreensão das características físicas e operacionais dos equipamentos. Porém, a maioria destes estudos 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 podem cita-se Sambasivam (2007) e Odenthal *et al.*, (2007). Entretanto, foram encontrados os trabalhos de Phillips, *et al.*, (1998), Junior, *et al.*, (2001) e Furtado, *et al.*, (2007) tratando da análise do desgaste na parede da coifa devido à erosão do material particulado contido no gás.

A grande dificuldade em se estudar o escoamento dos gases no interior do despoeiramento primário é a complexidade dos fenômenos físicos existentes. Estes englobam a ciência da

mecânica dos fluidos, transferência de calor, reações químicas e tribologia. O primeiro desafio é a obtenção dos padrões do fluxo turbulento na saída da boca do convertedor e na entrada da coifa. Para isso, é preciso compreender toda a trajetória do oxigênio que sai da lança e os gases gerados nas reações do banho. Esse processo corresponde a uma série de eventos tais quais: as características da deformação da superfície livre do banho causados pelo impacto do jato supersônico de oxigênio injetado pelo bico da lança, a pós-combustão de CO incluindo a transferência de calor por radiação, descarbonização e troca de energia na interface escória – aço e todas as reações químicas presentes no processo. Durante o escoamento no interior da coifa, o gás sofre grande resfriamento através das paredes refrigeradas, o que provoca uma enorme variação de densidade durante o percurso. Esse fluxo térmico é difícil de ser previsto, pois a transferência de calor por radiação também está presente em todo trecho. Medições em campo apresentam grandes dificuldades, pois são limitadas devido às condições extremas onde mesmo com as melhores tecnologias de medição não são capazes de obter todos os dados requeridos. Outro fator é que apesar das propriedades serem de possível medição, os instrumentos não conseguem cobrir todo o domínio físico onde ocorre o processo. Em complemento a esses fatores, a segurança também é um grande limitador dessas medições.

Não existem trabalhos experimentais aplicados para o escoamento no interior da coifa, somente experimentos laboratoriais com modelos físicos de água fria visando o movimento da mistura do banho (Shiv, 2006).

Dessa forma, a ferramenta computacional CFD (*Computational Fluid Dynamics*) vem despertando um interesse crescente na indústria, principalmente por envolver tempo e custos menores que métodos experimentais, além da possibilidade vasta possibilidades de solução dos mais variados fenômenos. Na siderurgia, a aplicação da ferramenta CFD para solução de inúmeros problemas, tem sido utilizada os quais podem citar-se, Assunção *et al.*(2007), Schien e Jonsson (1998) e Roldan (2006). Em relação à aciaria, podem-se apresentar outros trabalhos como Hou e Zou (2005), Lucas, et al. (n.d.) e Peters (2007). Com tudo, Schlüter e Vogl (2007) descrevem que na atualidade, em virtude das dificuldades de obtenção de dados experimentais, a simulação numérica CFD é o estado da arte na caracterização do comportamento dos fenômenos de transporte presentes em aciaria.

A Siderúrgica ArcelorMittal Tubarão (AMT) tem um histórico de falhas frequentes devido ao desgaste nas coifas de dois dos três convertedores instalados na aciaria, que são os convertedores 01 e 02. Foram 103 trocas de tubos de refrigeração da parede da coifa entre 2003 e 2008, totalizando um custo de manutenção e fabricação acima de R\$ 4.000.000,00 para os dois convertedores. Os reparos nos tubos não estão contabilizados neste valor, mas estima-se uma perda potencial de produção de R\$ 70.000,00 por hora de equipamento parado. O tempo de equipamento parado por consequência de falhas na coifa é em média de 80 horas anuais para cada convertedor. Estes dados foram retirados das planilhas das campanhas refratárias dos convertedores 01 e 02 da aciaria da ArcelorMittal Tubarão de 2003 a 2008.

Baseado no histórico de falhas das coifas dos convertedores da AMT, o objetivo deste trabalho é investigar, através da simulação numérica, as características do comportamento fluidodinâmico dos gases de exaustão captados no despoeiramento primário correlacionando-os com os desgastes ocorridos nas paredes das coifas. Com base neste objetivo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o escoamento do gás ao longo da coifa, identificando pontos críticos e comparar com histórico de falhas;
- Analisar interferência da temperatura no perfil do campo de velocidades escoamento do gás ao longo da coifa.

Assim o trabalho é estruturado em: capítulo 2, onde são abordadas as modelagens matemáticas e numéricas; capítulo 3, onde são feitas as análises dos resultados e finalmente, no capítulo 5, são feitas conclusões e as perspectivas futuras deste trabalho.

2. METODOLOGIA

Neste capítulo apresenta-se a modelagem matemática e o método numérico utilizado na representação do modelo de campo de velocidade e temperatura do escoamento. Numa primeira etapa apresentam-se as equações da continuidade e quantidade de movimento, também conhecida como equações de Navier-Stokes, para o escoamento de um fluido. Apresenta-se uma visão geral dos modelos de turbulência, dentre eles elege-se o modelo utilizado, apresentando as suas equações governantes. Na seção do método numérico, analisa-se em proporções simplificadas o método computacional utilizado neste trabalho.

2.1 Modelagem matemática

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.

Através da manipulação das equações correspondentes, pode-se analisar o comportamento dos fluidos newtonianos.

2.1.1 Equações governantes

As equações que regem o comportamento das propriedades de um fluido newtoniano, ou aproximado como um, ao longo de um escoamento são descritas por:

Equação da Conservação de Massa na equação 2.1

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

Já nas equações 2.2 a 2.4 são apresentadas as formulações da Conservação da Quantidade de Movimento

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \rho g \delta_{3i}, \quad (2.2)$$

onde,

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \left(P + \frac{2}{3}\mu \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2.3)$$

e

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right). \quad (2.4)$$

A equação da Conservação de Energia é dada pela equação 2.5

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_c \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \Phi + \left(\frac{\partial p}{\partial t} + U_i \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + H \quad (2.5)$$

e

$$\frac{\partial h}{\partial x_i} = c_p \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (2.6)$$

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.

2.1.2 Modelos de turbulência

A turbulência ocorre quando a inércia de um fluido começa a se tornar significativa comparada com as forças viscosas, o que é caracterizado pelo alto número de Reynolds. Quando o escoamento é turbulento, o perfil de camada limite é modificado, o que causa uma diferença significativa no comportamento escoamento final. Para calcular tal fenômeno existem três classes principais de modelos de turbulência são elas:

- Simulação Numérica Direta (DNS): simula o escoamento turbulento partir das equações governantes;
- Simulações de Grande Escala (LES): simula diretamente o escoamento de grande escala e modela os de pequena escala; e
- Equações Médias de Reynolds (RANS): resolve o escoamento laminar médio e modela a turbulência como um desvio desta média.

Como na maioria dos casos de aplicações de engenharia não é necessário obter resultados com grande precisão quantitativa com relação às menores escalas de turbulência, mesmo porque, os métodos capazes de simular tal escala necessitam de grande esforço computacional. Devido à isso, neste trabalho adotou-se o modelo κ - ϵ para modelagem da turbulência. Esse modelo foi escolhido, pois é mais difundido pelos códigos computacionais por apresentar bons resultados e não necessitar de muito esforço computacional.

O modelo padrão κ - ϵ foi primeiramente desenvolvido por Jones e Launder (1972), ele se baseia na classe dos modelos de duas equações. Necessita-se então da introdução de modelos para modelagem da turbulência. RANS, *Reynolds Average Navier-Stokes*, método proposto

por Osborne Reynolds em 1895, trata de maneira estatística as equações governantes na busca de uma melhor representação do escoamento turbulento. Esse tratamento consiste na aplicação da decomposição das propriedades envolvidas, na forma de valores médios e de suas flutuações, nas equações de conservação da quantidade de movimento e das demais equações que governam os fenômenos de transporte envolvidos em cada problema.

A média temporal da propriedade é definida pela equação 2.7

$$\bar{\phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \phi dt \quad (2.7)$$

onde Δt é um tempo infinitamente pequeno, todavia infinitamente grande se comparado com as flutuações turbulentas. Separando o escoamento médio, das flutuações tem-se:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.8)$$

Onde ϕ é uma propriedade instantânea do fluido, $\bar{\phi}$ a média temporal e ϕ' a flutuação da propriedade instantânea, que por sua vez possui média nula. Esta propriedade é mais bem apresentada na Figura 1.

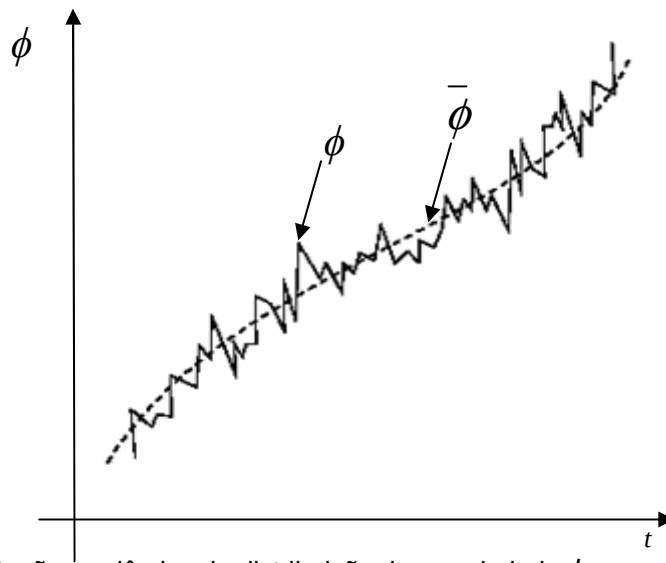


Figura 1 - Representação randômica da distribuição da propriedade ϕ

Fonte: Santos (2000)

Utilizando este conceito de turbulência e introduzindo nas equações de transporte, têm-se as equações médias temporais. As equações de conservação escritas em termos de quantidades médias como apresentadas abaixo, assumem que as propriedades ρ , μ_{lam} e D_m são consideradas constantes.

A equação da Continuidade é apresentada na equação 2.9.

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.9)$$

Equação da Conservação da Quantidade de Movimento:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_i \bar{U}_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial (\overline{v'_i v'_j})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[- \left(\frac{\bar{p}}{\rho} + \frac{2}{3} \frac{\mu_{lam}}{\rho} \frac{\partial \bar{U}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} + 2 \frac{\mu_{lam}}{\rho} \bar{S}_{ij} \right]$$

Onde:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right), \quad -\overline{v'_i v'_j} = \tau_{ij}^{turb} \quad (2.10)$$

e

$$- \left(\frac{\bar{p}}{\rho} + \frac{2}{3} \frac{\mu_{lam}}{\rho} \frac{\partial \bar{U}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} + 2 \frac{\mu_{lam}}{\rho} \bar{S}_{ij} = \tau_{ij}^{lam} \quad (2.11)$$

O termo adicional à equação da quantidade de movimento é chamado de fluxo turbulento. Mais especificamente denominado Tensor de Reynolds (τ_{ij}^{turb}), onde as componentes da diagonal principal representam as flutuações das pressões dinâmicas e as demais componentes representam as tensões de cisalhamento devido às variações da velocidade. Nesse caso, o problema da modelagem é reduzido ao cálculo do tensor das tensões de Reynolds e dos outros

fluxos turbulentos. Porém o cálculo dos tensores não é direto, pois com a introdução de outra variável em um sistema estático, este se torna hiperestático (infinitas soluções). Para solucionar, é necessário inserir outra equação para tornar o sistema novamente estático, solução que é denominada problema de fechamento da turbulência, a qual ainda é considerada em aberto na física contemporânea. Para tornar a descrição matemática da turbulência um problema com solução possível, é necessário a utilização de um número finito de equações e a aproximação das variáveis desconhecidas em termos das quantidades conhecidas, o que caracteriza a ordem do fechamento (Davidson 2004).

Existem algumas maneiras de modelar os termos que surgem da integração proposta pelas equações médias de Reynolds. O modelo κ - ϵ segue a metodologia da viscosidade turbulenta conforme equações 2.12 e 2.13.

$$\tau_{ij}^{turb} = -\frac{2}{3} \left(\kappa + \frac{\mu_t}{\rho_0} \frac{\partial \bar{v}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} + 2 \frac{\mu_t}{\rho_0} \bar{S}_{ij} \quad (2.12)$$

e

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_j \kappa)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\bar{u}_i' \left(\frac{u_j' u_j'}{2} + \frac{p'}{\rho} \right) \right] - \bar{u}_i' u_j' \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \beta g \delta_{i2} \bar{u}_i' T' - \frac{\mu_{lam}}{\rho} \frac{\partial \bar{u}_i'}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i'}{\partial x_j} \quad (2.13)$$

onde κ é a energia cinética turbulenta e μ_t a viscosidade turbulenta, função da intensidade da turbulência do escoamento. Os passos necessários para a solução de um modelo κ - ϵ são:

- Inserir uma equação diferencial adicional para calcular κ ;
- Inserir uma segunda equação diferencial adicional para calcular ϵ ;
- Obter o valor da viscosidade turbulenta μ_t pela equação 2.14.

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho \kappa^2}{\epsilon} \quad (2.14)$$

Onde C_μ é uma constante empírica, a qual é usual ser utilizado o valor de 0,09 (Launder e Spalding 1974). K é definido conforme equação 2.13 e o termo dissipação da energia cinética turbulenta ε é calculado pela equação diferencial 2.15.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{v}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_{turb}}{\rho \sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{K} (C_1 P_K + C_3 G_K) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (2.15)$$

Onde C_1 , C_2 , C_3 e σ_ε são constantes empíricas.

2.1.3 Condições de contorno

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 de operação do equipamento, quando este é submetido ao regime mais severo de operação. A Figura 2, mostra o registro do processo do dia 15 de março de 2009 de 17:07:33 a 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. É válido frisar, que as características geométricas e operacionais dos convertedores 01 e 02 são idênticas.

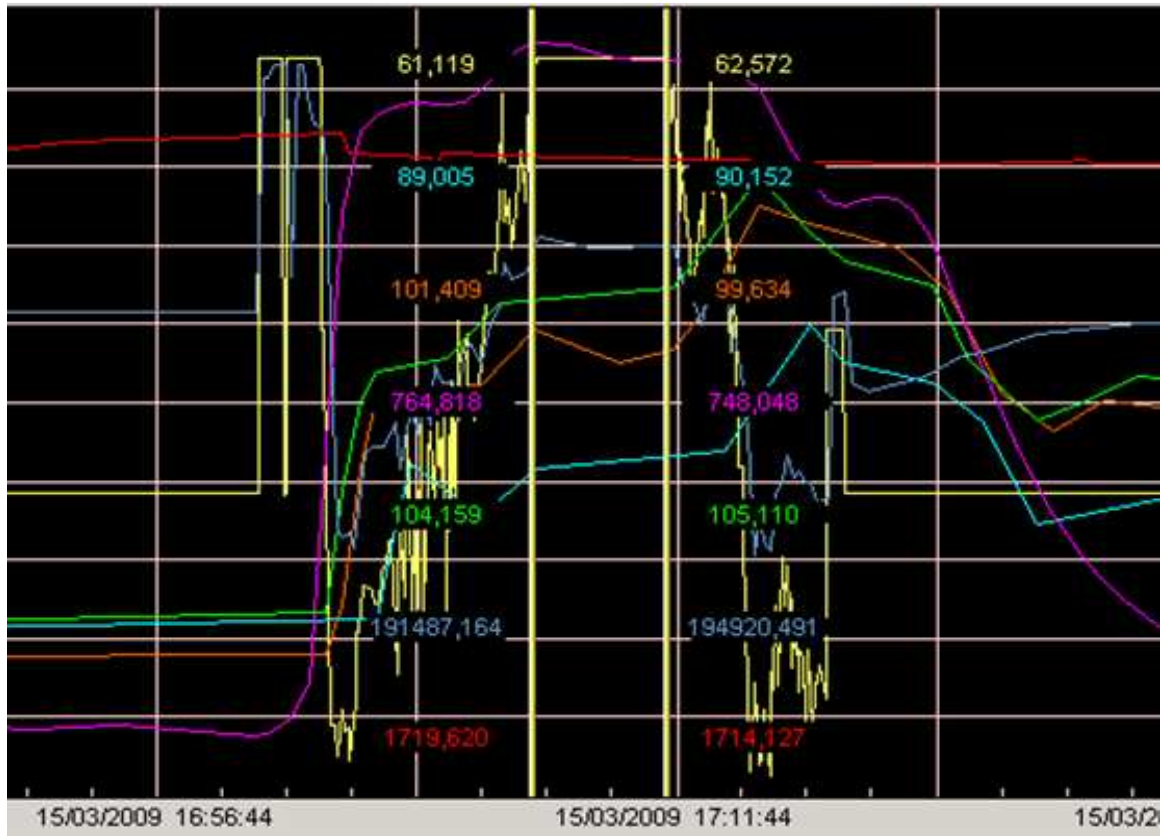


Figura 2 - Tela de interface do usuário do programa de monitoramento da AMT(2009).

Sendo as linhas as seguintes medições:

- Azul clara: temperatura de entrada da água de refrigeração em graus Celsius;
- Verde: temperatura de saída da água de refrigeração em graus Celsius;
- Vermelho: vazão de água de refrigeração em graus Celsius;
- Azul escura: vazão LDG em normal metro cúbico;
- Amarela: posição da válvula de sopro “pêra”;
- Rosa: temperatura de saída do gás LDG em graus Celsius.

Para a modelagem computacional, algumas simplificações foram feitas devido às limitações de recursos computacionais. Seria necessário um super computador para processar os cálculos de uma modelagem que considere exatamente todas as características geométricas do equipamento e físicas do processo.

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

<i>DADOS</i>	<i>VALOR</i>
Temperatura de saída do LDG	748, 048 [°C]
Vazão de Gás LDG	194.929, 491 [Nm³/h]
Temperatura da água na entrada	90, 152 [°C]
Temperatura da água na saída	105, 110 [°C]
Vazão de água	1714, 127 [Nm³/h]

Fonte: AMT, 2009

A primeira simplificação considerada para o modelo foi a geometria da coifa. A coifa, como citado no Capítulo 1, é formada por uma sessão de tubos em aço de baixo carbono que tem a função de resfriar o gás (ver Figuras 3(a) e 3(b)). Esta geometria tem uma área de contato com o gás de 786 m². Tal valor é quase 55% maior do que a área da coifa do modelo computacional que é de 511 m².

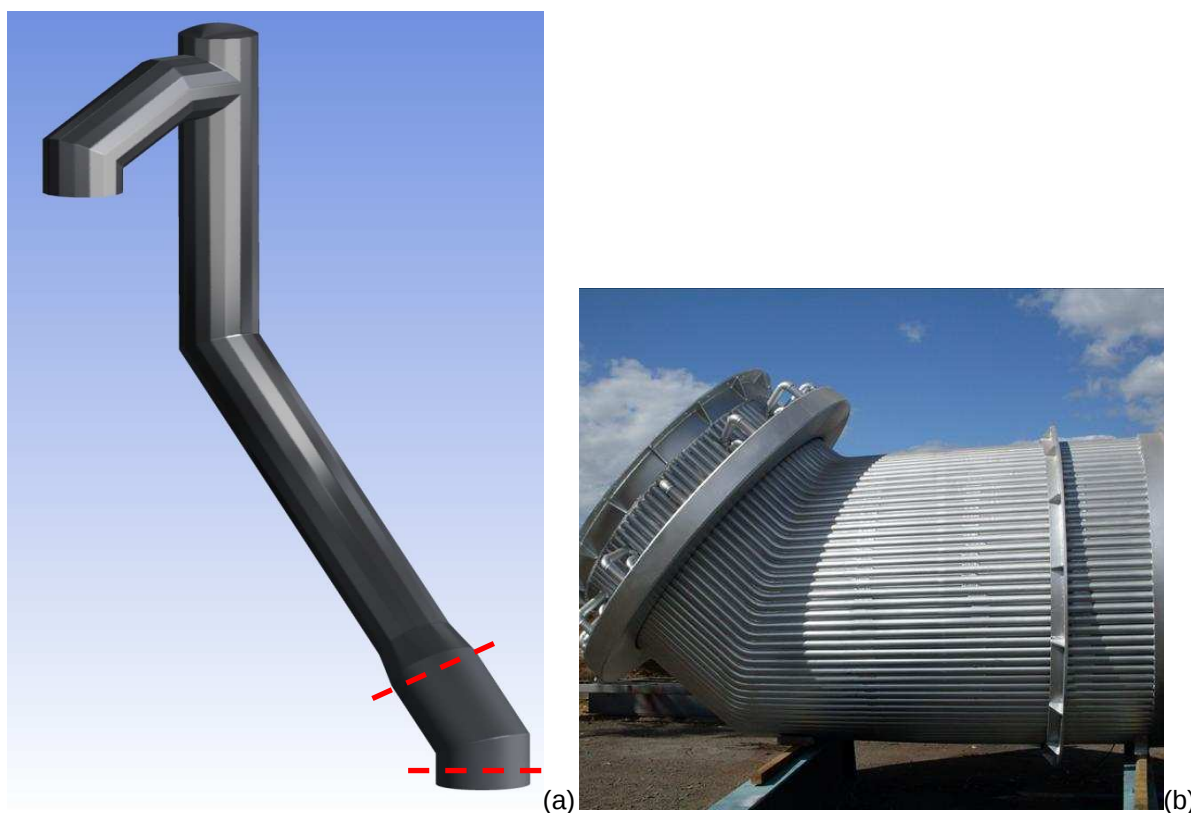


Figura 3 - Comparativo entre geometria superficial da coifa: (a) computacional completa; (b) seção real da coifa indicada na Figura 3(a).

O perfil de velocidades na entrada da coifa também foi simplificado. O jato supersônico que sai da lança de oxigênio gera quantidade de movimento que impulsiona os demais gases gerados durante as reações químicas do sopro. Essa mistura resulta em um ambiente onde os gases saem do convertedor num escoamento com grande intensidade de turbulência. A Figura 4 mostra uma representação dos gases gerados no sopro que saem da boca do convertedor. Sabendo-se que esse perfil de velocidades é complexo e de difícil previsão, opta-se por utilizar, na simulação computacional, um perfil de velocidades com distribuição uniforme na seção de entrada da coifa. Essa escolha ainda é adotada pelo fato de não ter sido encontrado trabalho publicado sobre o comportamento do escoamento de saída de convertedor durante o sopro.

O gás utilizado é o LDG, que é o gás exaurido pelo convertedor. Sua composição química é mostrada na Tabela B.5. Os valores das propriedades dos gases foram coletados na tabela de propriedades termo físicas do livro Fundamentos de transferência de calor e de massa (Incropera, 2008). Foram utilizadas curvas de tendência do Excel para chegar a uma equação dependente da temperatura. Para o cálculo da densidade utilizou-se um valor correspondente a uma pressão de 1 atm.

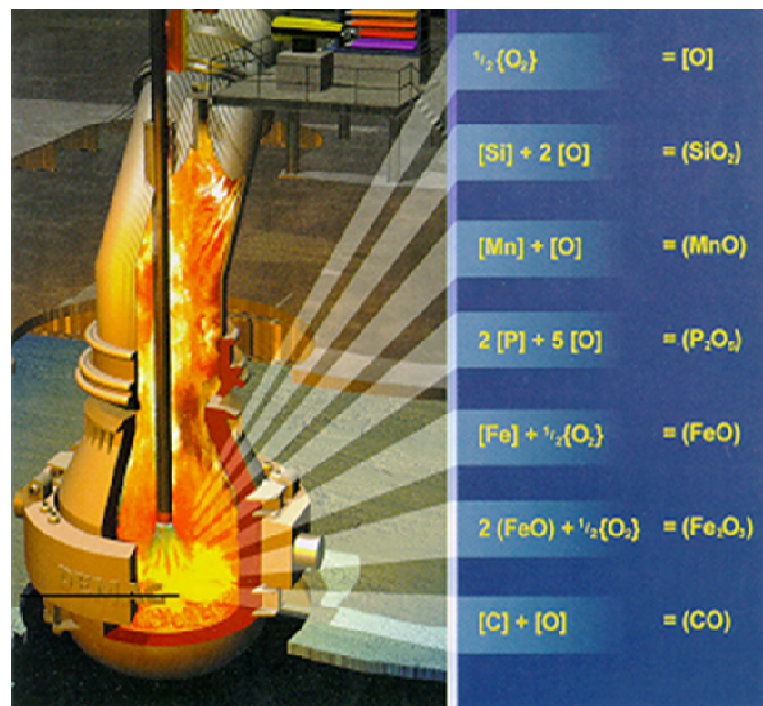


Figura 4: Esquema mostrando convertedor em funcionamento e reações que ocorrem.

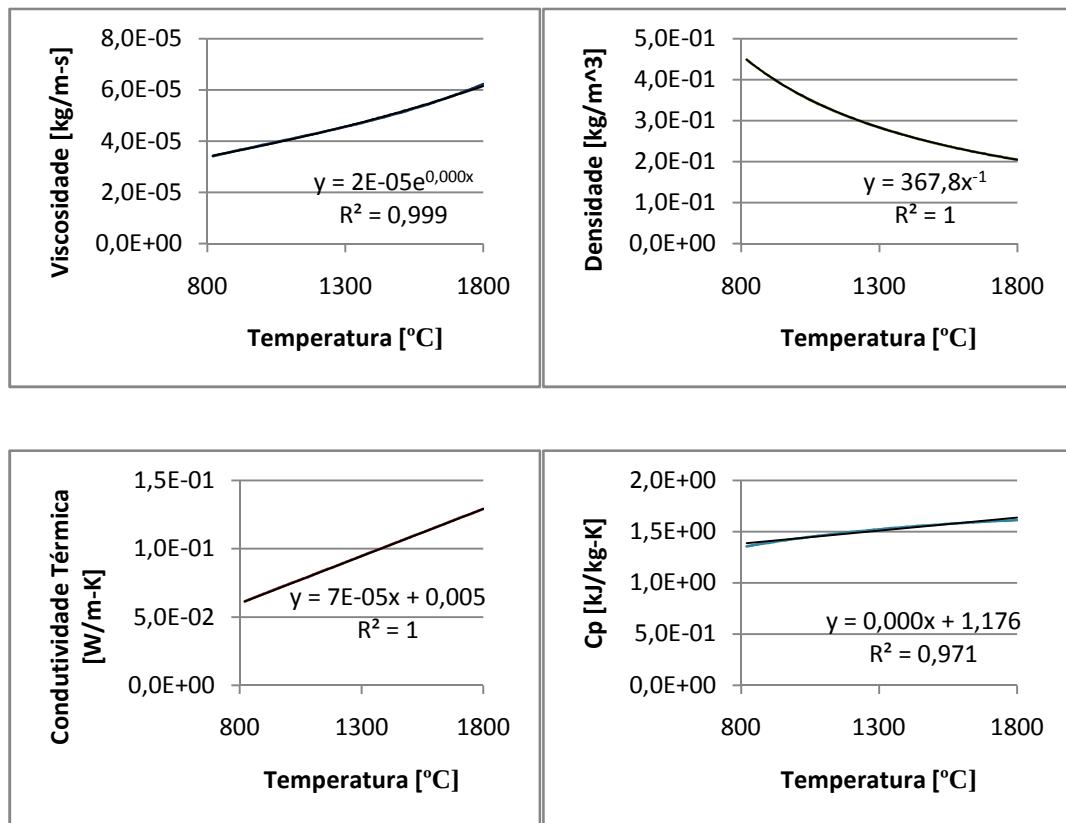


Figura 5 – Gráficos de propriedades do gás LDG.

Na parede é considerada a condição de não deslizamento e temperatura constante na face interna. A condição de contorno de não deslizamento garante a velocidade nula do elemento fluido em contato com a parede da parede e a condição de temperatura, garante que a face interna da coifa está a 110°C, baseada em termografia, sendo desprezada a condução na espessura dos tubos.

Na face de entrada a condição de contorno foi definida como perfil uniforme de velocidades. Nesta condição de contorno, a velocidade é considerada constante, distribuída por toda a face uniformemente e a direção dos vetores velocidade são normais à face definida.

Na condição de contorno para a face de saída da coifa, é considerada a condição de abertura ou *Opening*. Nesta condição, o fluxo reverso é permitido sendo calculado pela diferença de pressão entre a saída (p_s) e a pressão especificada (p_E) para o domínio externo. Esta condição é dada pela equação 2.16 para escoamento de entrada(a) e de saída(b). O coeficiente f é

representa o coeficiente de perda que também é especificado, para o presente estudo este foi desconsiderado ($f = 1$).

$$p_E - \frac{1}{2} f \rho U_i^2 = p_S \quad (a) \qquad p_E + \frac{1}{2} f \rho U_i^2 = p_S \quad (b) \quad (2.16)$$

Neste estudo são analisados dois casos. O caso 1 considera o gás LDG entrando na coifa com a temperatura de operação (1800 °C), mas despreza a transferência de calor. As condições de troca térmica são consideradas no caso 2. A transferência de calor entre a face interna da coifa e o fluido é calculada somente pelo mecanismo de convecção, negligenciando o fenômeno de radiação. Em ambos os casos é considerado escoamento monofásico. Esta consideração é feita devido a ausência de dados concretos da avaliação granulométrica do material em suspensão. Tais materiais são de difícil coleta, devido à severidade do meio. Acredita-se que a partícula contribui significativamente no desenvolvimento das propriedades ao longo do escoamento.

2.1.4 Critério de convergência

O critério de convergência é um conjunto de regras em que baseado nele o código CFD encerra suas interações. O critério adotado neste trabalho é de 400 interações ou resíduo máximo menor que $1e-4$. Esses critérios são recomendados para aplicações de pesquisas em engenharia conforme *ANSYS CFX Theory Guide* (2006).

2.2 Modelagem numérica

A modelagem numérica tem por finalidade solucionar as equações de Navier-Stokes em escoamentos reais, uma vez que a forma analítica somente é obtida para escoamentos simples e ideais. Este procedimento de solução gera um conjunto de equações algébricas a serem resolvidas por um algoritmo de solução de equações lineares. Neste trabalho utiliza-se o código computacional ANSYS CFX 11.

2.2.1 Método dos volumes finitos

O conceito do método dos volumes finitos envolve a discretização do domínio espacial em volumes de controle, também chamado de malha computacional. As equações governantes são integradas ao longo de cada volume de controle e ao longo de um intervalo de tempo (caso o problema seja transiente), assim garantindo que as propriedades (massa, quantidade de movimento, energia, etc.) sejam conservadas discretamente para cada volume. Este procedimento gera um conjunto de equações algébricas ou equações de discretização que contem os valores das propriedades para um grupo de pontos contidos na malha computacional. Esse conjunto de equações pode ser expresso na forma:

$$\sum_{nb_i} a_i^{nb} \phi_i = b_i, \quad (2.17)$$

Onde ϕ são os valores de uma propriedade genérica, b os resultados, a os coeficientes das equações, i é o ponto nodal em questão e nb significa “*neighbourhood*”, ou seja, vizinhança.

A Figura 4 apresenta uma representação esquemática de um volume de controle na malha computacional utilizada no CFX. O volume de controle, representado pela área escura, contém apenas um ponto ou ponto nodal, onde todas as soluções das variáveis e propriedades fluidas são armazenadas. E como pode se observar, cada ponto nodal está cercado por um conjunto de superfícies que compreendem o volume finito nos nós do elemento.

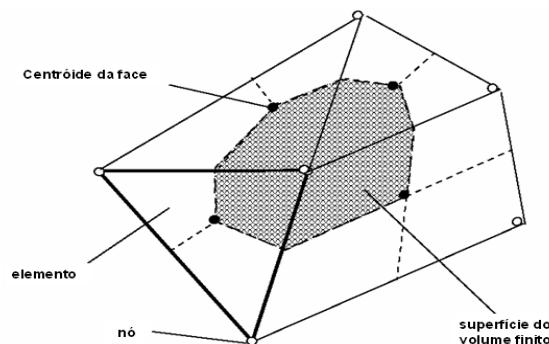


Figura 6 - Superfície de um volume finito.

Fonte: ANSYS CFX Theory Guide (2006).

2.2.2 Esquema de advecção

Os termos convectivos são difíceis de ser analisados, pois a velocidade de convergência e a robustez dos esquemas dependem das variáveis do problema proposto. Devido a estas dificuldades, existem vários esquemas para a discretização destes termos tais como método das diferenças centrais, *Upwind*, *Quick* e *Power-Law* (Versteeg, 1995). O CFX utiliza o esquema denominado *High Resolution* que é um modelo “híbrido” entre o método *upwind* de primeira ordem e segunda ordem.

O esquema *High Resolution* utiliza o coeficiente *Blend factor*(β) ou fator de suavização como forma de cambiar a ordem dos métodos. Este esquema calcula o termo β localmente quando há um aumento brusco no gradiente da propriedade aproximando naquele ponto a um esquema de primeira ordem evitando assim a divergência dos valores neste ponto.

$$\phi_{ip} = \phi_{up} + \beta \Delta \phi$$

(2. 18)

2.2.3 Solução do sistema linear de equações

O ANSYS CFX utiliza para solucionar os sistemas de equações lineares a técnica interativa *Incomplete Lower Upper* (ILU) com *Multigrid* (MG) *accelerated*. Uma explicação mais detalhada é encontrada no ANSYS CFX Theory Guide (2006).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção apresenta-se a escolha da malha computacional utilizada. Na seção 3.2.1 analisa-se os padrões de escoamento numa condições onde a transferência de calor é negligenciada dando ênfase em regiões críticas identificadas em histórico de falhas, regiões onde ocorrem velocidades altas e recirculação. Na seção 3.2.2 é feito um comparativo entre a simulação da seção 3.2.1 e uma simulação considerando transferência de calor, com intuito de se observar a variação dos padrões de escoamento devido a presença de gradientes de temperatura.

3.1 Malha utilizada

A escolha da melhor malha é o principal problema na solução da dinâmica dos fluidos computacional. Quando esta é escolhida de maneira incoerente, traz divergências entre o comportamento real e o comportamento numérico das propriedades analisada. A escolha da malha foi baseada na análise do campo de velocidades em determinadas seções do escoamento. A Figura 7 demonstra a diferença visual entre estas malhas tomando como ponto de referência face de entrada do escoamento. Foram analisadas as malhas com aproximadamente dois milhões de nós(Figura 7a), um milhão de nós(Figura 7b) e quinhentos mil nós(Figura 7c).

Percebe-se ao analisar a Figura 8, que em todas as malhas a região próxima à parede possui a malha mais com um maior grau de refinamento. Isto se deve a uma ferramenta de geração de prisma contida no software comercial ICEM CFD 11.0, que foi usado como gerador de malha deste trabalho. O papel desta ferramenta é criar prismas próximos às regiões escolhidas, aumentando a resolução da malha nesta região e assim colaborando para a diminuição do erro. Para análise deste trabalho foram inseridos prismas nas regiões de contorno definidas como paredes.

A Figura 8 demonstra o comparativo entre os perfis de velocidade das diferentes malhas. Percebe-se que há proximidade nos resultados para maioria das regiões analisadas. Na seção 4 da coifa, nota-se diferenças entre as velocidades, visto que nesta área ocorrem altas

velocidades do fluido, portanto crítica. Com base nessa análise, opta-se pela configuração da malha de maior quantidade de nós.

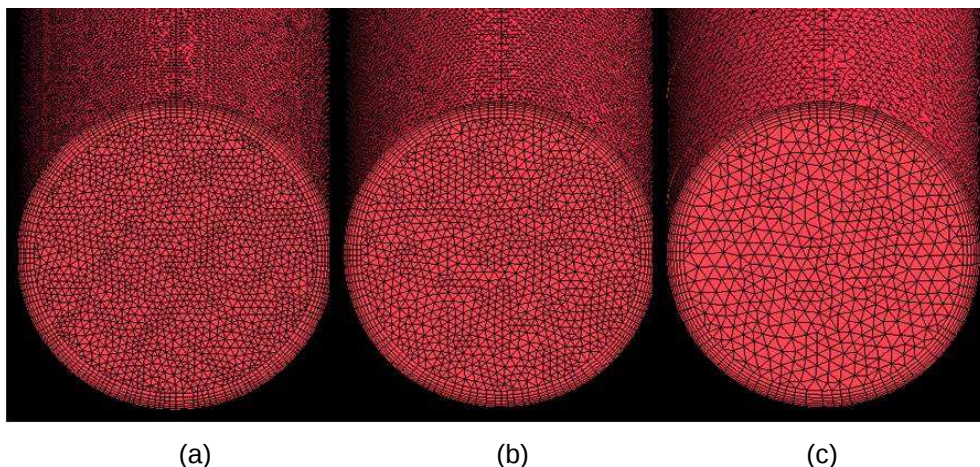


Figura 7 - Demonstrativo de 3 diferentes malhas na superfície de entrada da coifa móvel.

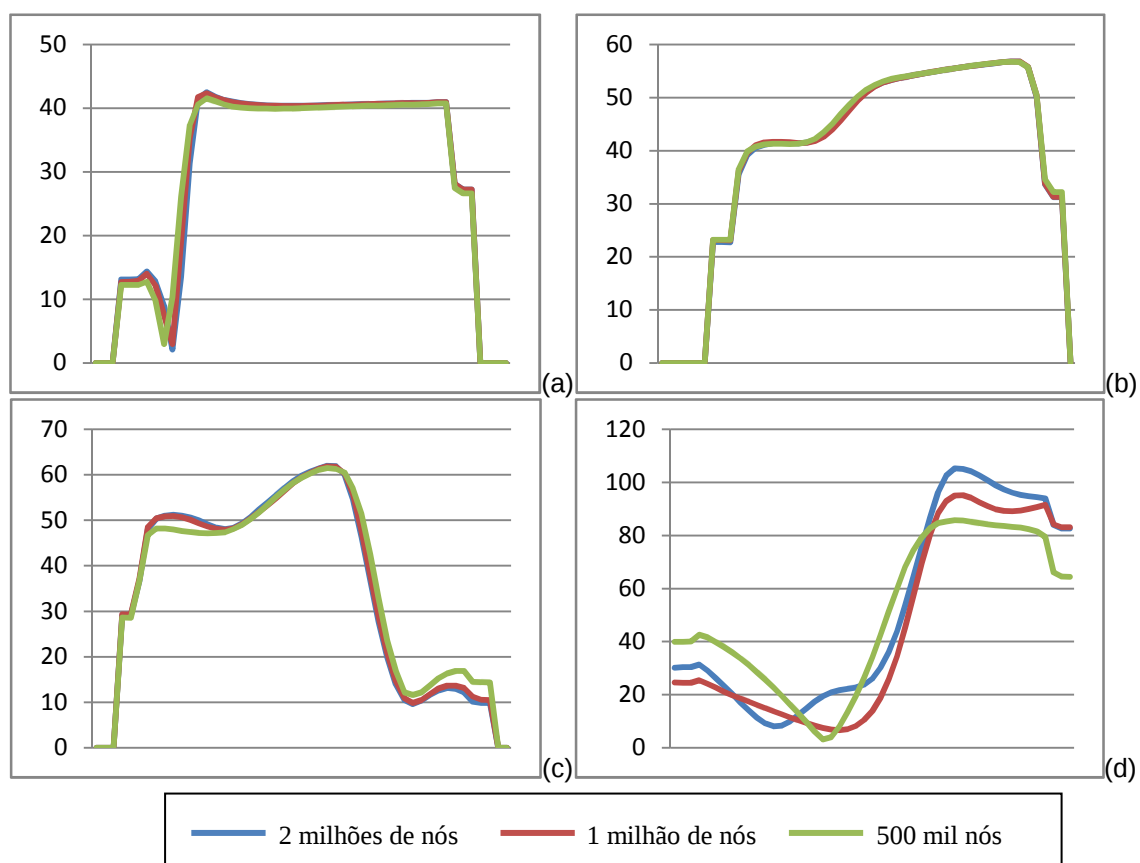


Figura 8 - Gráfico exibindo a diferença das velocidades em 3 diferentes malhas em 4 seções.

3.2 Avaliação de resultados

Nesta seção são mostrados resultados de dois estudos. No primeiro estudo faz-se uma avaliação sobre o comportamento do escoamento e compara-o com o histórico de falhas, analisando quais seriam as possíveis causas destas falhas. No segundo estudo, são analisados as diferenças entre o escoamento do caso do estudo um com um escoamento com variação de temperatura explorando a influência do perfil de temperatura no desenvolvimento do perfil de velocidades do escoamento.

O anexo B traz informações necessárias para o melhor entendimento das expressões e pontos de referência citados na presente seção.

3.2.1 Primeiro Estudo

A velocidade do fluido é a maior causadora de erosão em tubulações de despoeiramento. O controle desta propriedade auxilia no entendimento da maioria dos fenômenos de desgaste nestas tubulações.

Neste caso, como citado na seção 2.1.3, é considerada uma condição adiabática na parede interna, ou seja, não há troca calor com o fluido. Portanto o fluido tem temperatura constante ao longo do escoamento. As propriedades foram mantidas a 1800 °C, temperatura de saída da boca do convertedor.

A Figura 9(a) mostra a entrada da coifa móvel, onde o fluxo entra com distribuição uniforme e tem a sua primeira mudança de direção. Esta mudança provoca o descolamento da camada limite do escoamento, gerando assim uma zona de baixa pressão, formando uma recirculação localizada nesta posição. São indicados na Figura 9(b) os vetores velocidade, identificando a recirculação. Esta recirculação é caracterizada como tridimensional como pode ser vista na Figura 10. O fenômeno descrito acima, aliado à quantidade de material abrasivo transportado pelo fluido, gera uma zona de erosão intensa que pode ser comprovado pelo histórico de falhas do equipamento, que apresenta esta área como sendo crítica de erosão da parede. Este

fator crítico é atribuído ao fato das falhas ocorrerem fora do tempo previsto como pode ser visto na Tabela B.4, que por consequência gera uma possível parada de produção.

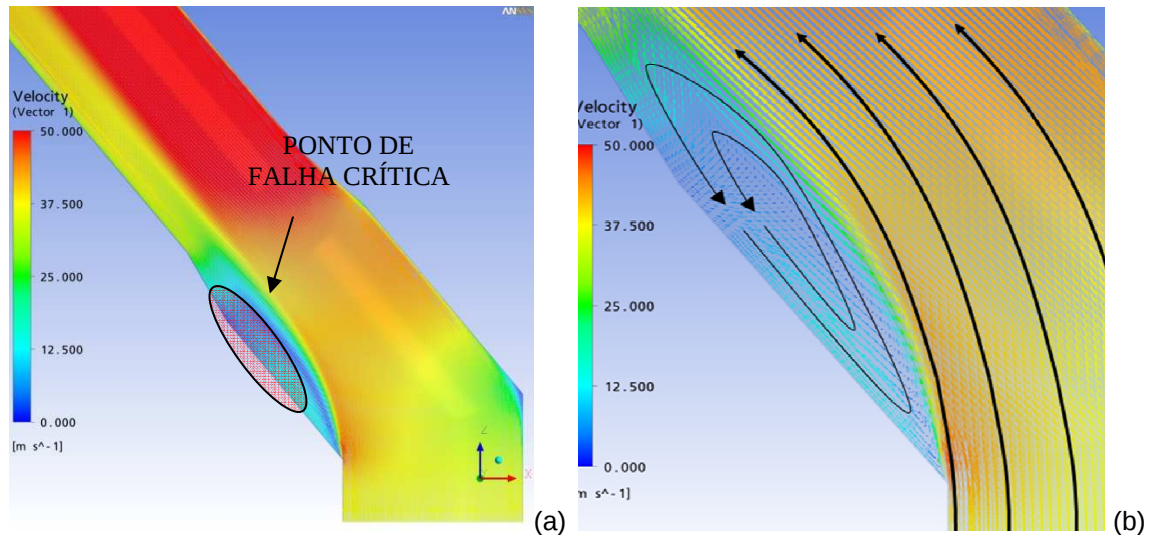


Figura 9 - Vetores velocidade na região da coifa móvel após curva(a) e com imagem ampliada(b).

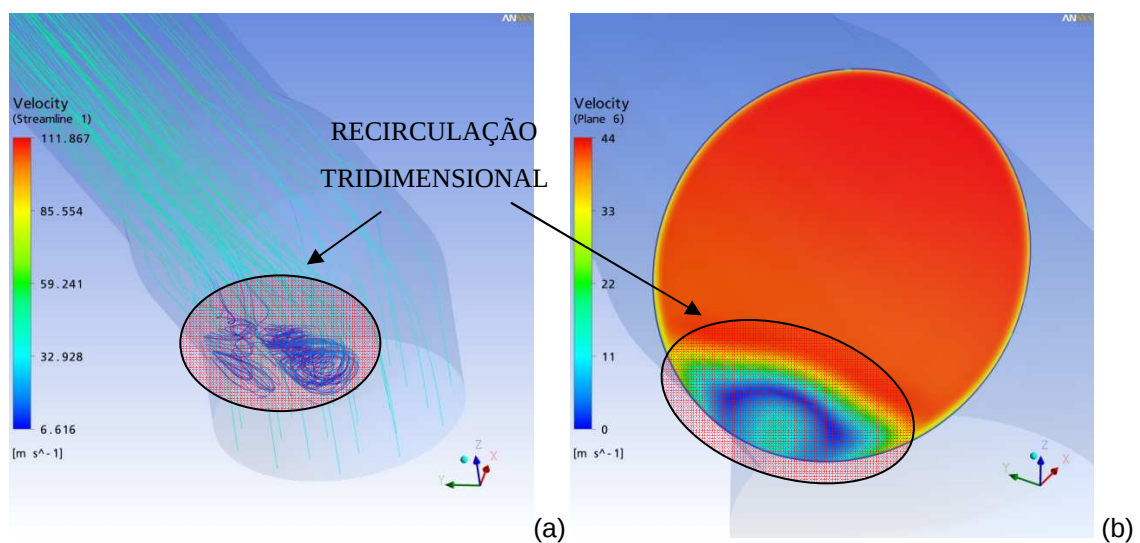


Figura 10 - Linhas de corrente(a) e perfil de velocidade (b) na coifa móvel antes do difusor

A velocidade do fluido na região da coifa fixa é também alvo deste estudo. Conforme conhecimentos técnicos industriais, para garantir o transporte de partículas em tubulações é necessário que a velocidade de fluxo seja superior a 20 m/s. Baseado nesta informação, foi analisada a velocidade nas seções de A à G, onde segundo relatórios de manutenção (Tabela B.4), ocorre grande desgaste pelo escorregamento do particulado em zonas de baixa velocidade. Conforme Figura 11 percebe-se a região de baixa velocidade na parte inferior da tubulação, aproximadamente 30 m/s, porém alta suficiente para arrastar as partículas, se

baseado nos conhecimentos técnicos. Possivelmente a geometria real da coifa, com a ondulação dos dutos, provoque uma zona de baixa velocidade nas regiões próximas à parede, afetando diretamente o transporte da partícula. Outro fator que deve ser considerado é o tamanho do particulado, que existe uma porcentagem com diâmetros de até 2mm e densidade que é próximo de 4g/cm^3 . É importante ressaltar que o material é metálico, tal característica gera uma alta taxa de desgaste por erosão.

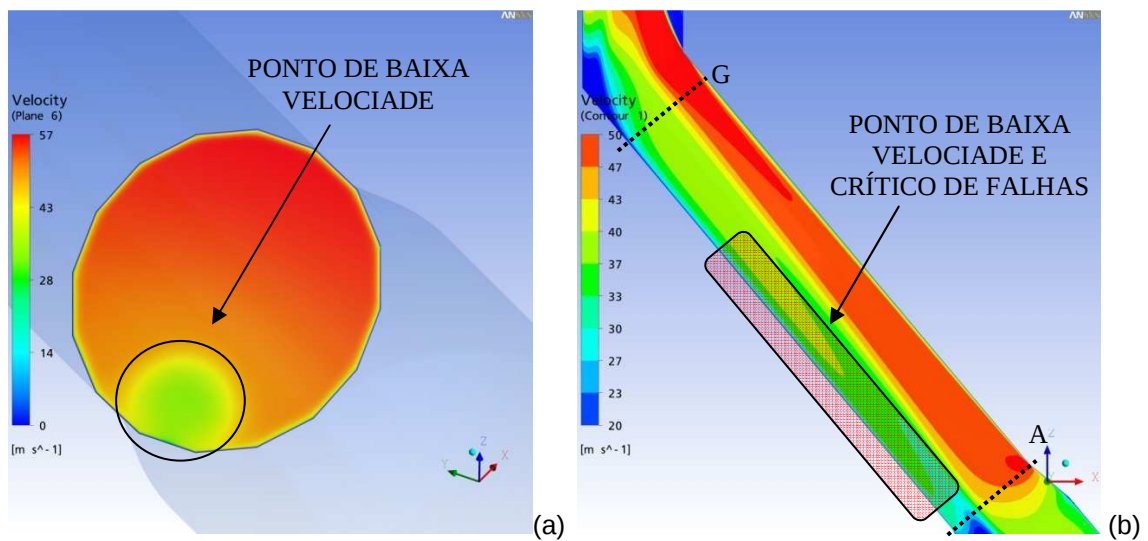


Figura 11 – Demonstração de velocidade em plano perpendicular ao fluxo no início da rampa(a) e vista lateral(b). Seções de A à G.

Na seção HL da coifa ocorrem dois fenômenos semelhantes, porém, com consequências distintas. A recirculação de fluido que ocorre na parte externa da curva é gerada pelo fluxo preferencial mostrado na Figura 12(a). É possível que nesta região o particulado da parte inferior da rampa entre nesta zona de baixa velocidade como ilustrado na Figura 12(b) e gere erosão similar à que ocorre na coifa móvel. Esta erosão é identificada nos relatórios de manutenção do equipamento nesta seção. Na parede interna da curva é gerado um descolamento da camada limite, que produz uma zona de recirculação. Isso leva a concluir que a posição vertical da parede, desfavoreça a erosão, porém o material em circulação é uma das possíveis geradoras de material aderido à parede, conhecido como Cascão. O Cascão quando não controlado pode obstruir a passagem do gás, alterando os padrões do escoamento e possivelmente, afete a eficiência de operação do equipamento.

A seção QRS é caracterizada por altas velocidades devido a mudança brusca de direção do escoamento. Como pode ser visto na Figura 13(a), o escoamento por forças inerciais tende a se projetar na parede superior do duto. Esta projeção causa uma erosão na superfície de contato com o fluido. Percebe-se também pela Figura 13(b) que o escoamento é assimétrico. A Figura 14(a) mostra o cisalhamento entre a parede e o fluido. Os pontos vermelhos desta Figura são caracterizados por zonas de intensa erosão e alto desgaste, segundo relatórios técnicos de manutenção. Com a ocorrência da assimetria do escoamento é gerado uma recirculação no plano y-z (Figura 14(b)). É provável que, devido a este fato, não ocorra erosão, mas sim a ocorrência de cascão na parte inferior da seção QRS, o que é respaldado pelo histórico de manutenção.

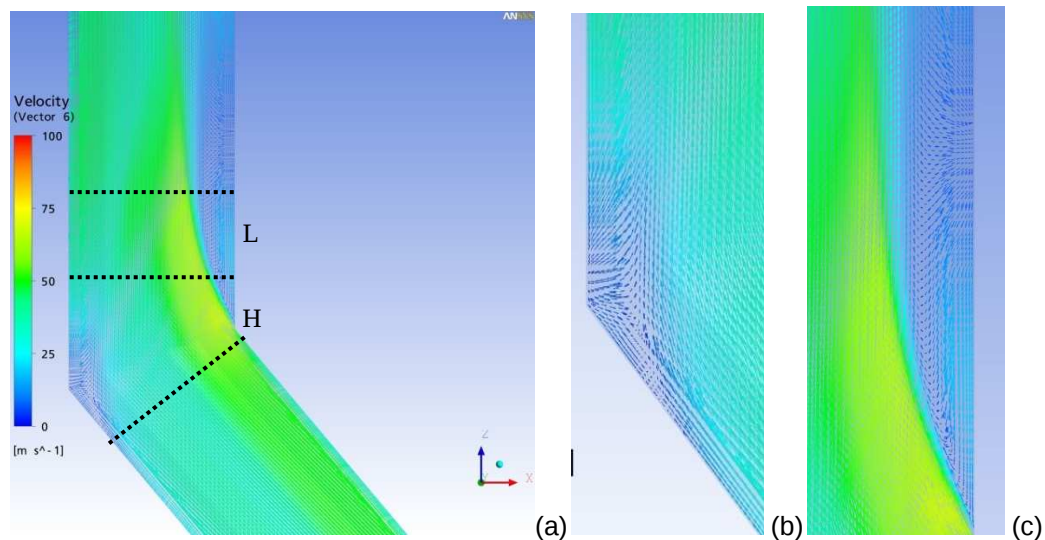


Figura 12 - Vetores velocidade da coifa fixa na seção HL(a) na parte externa(b) e interna(c) da curva.

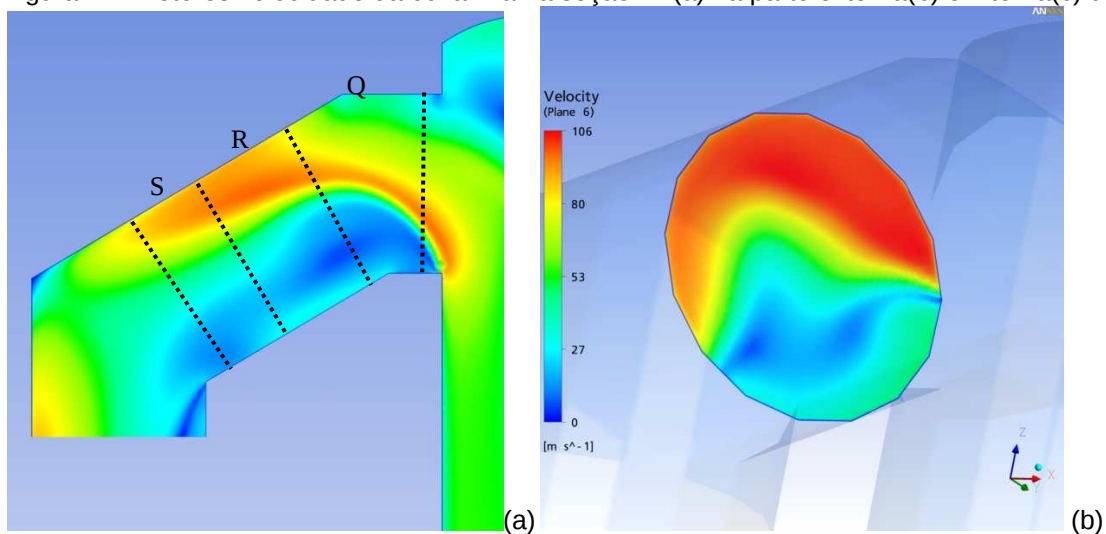


Figura 13 – Demonstração da velocidade na coifa fixa após curva na seção QRS: Vista lateral (a); Vista Isométrica(b).

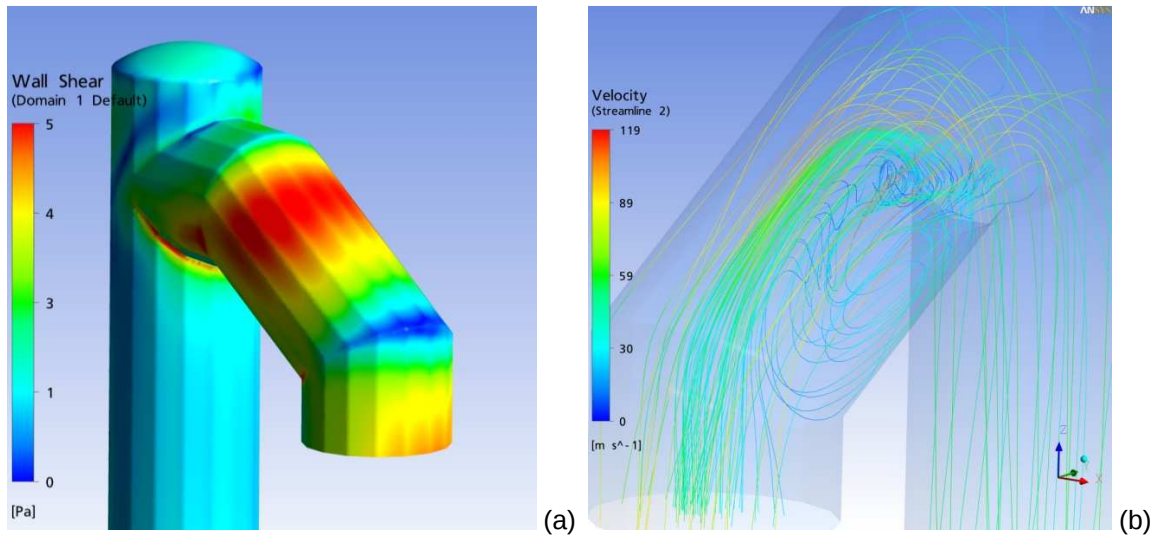


Figura 14 – Cisalhamento entre a parede e o fluido(a) e linhas de corrente em vista Isométrica(b) na coifa fixa após curva na seção QRS.

3.2.2 Segundo Estudo

Neste segundo estudo, são comparados os dois Casos propostos no capítulo 2, a fim de observar a influência da temperatura no perfil de velocidades do modelo estudado por este trabalho. Sabe-se que nas equações de quantidade de movimento e da continuidade, a densidade está presente em vários termos. Portanto, como a densidade varia de acordo com a temperatura (Figura 5) suspeita-se que esta mudança proporcione um gradiente de temperatura que afete intensamente o perfil de velocidades.

O caso 2 propõe uma condição de térmica por convecção somente. Esta condição de contorno é feita através da fixação da temperatura da parede a 110 °C, consideração que é respaldada pela termografia mostrada na Figura B.5. Na Figura 16 é mostrado o perfil de velocidade no plano x-z do escoamento no caso 1 e 2 respectivamente.

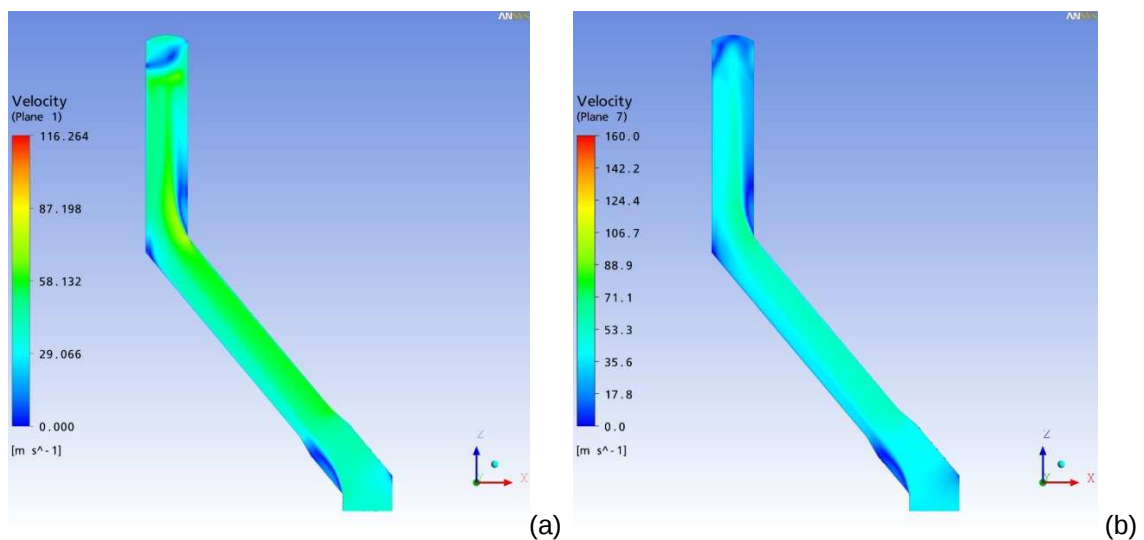


Figura 15 - Comparativo de velocidades sem e com troca térmica na seção x-z. (a) caso 1 e (b) caso 2.

Como a velocidade do fluido está diretamente relacionada ao fluxo volumétrico, e este diretamente relacionado à densidade, que por sua vez é dependente da temperatura, então, pode-se afirmar que nesse caso a velocidade está ligada diretamente à temperatura. As Figuras 16 e 17 apresentam uma comparação entre os campos de velocidades do caso 1 e 2. É possível observar que o padrão de escoamento é significativamente diferente entre os dois casos.

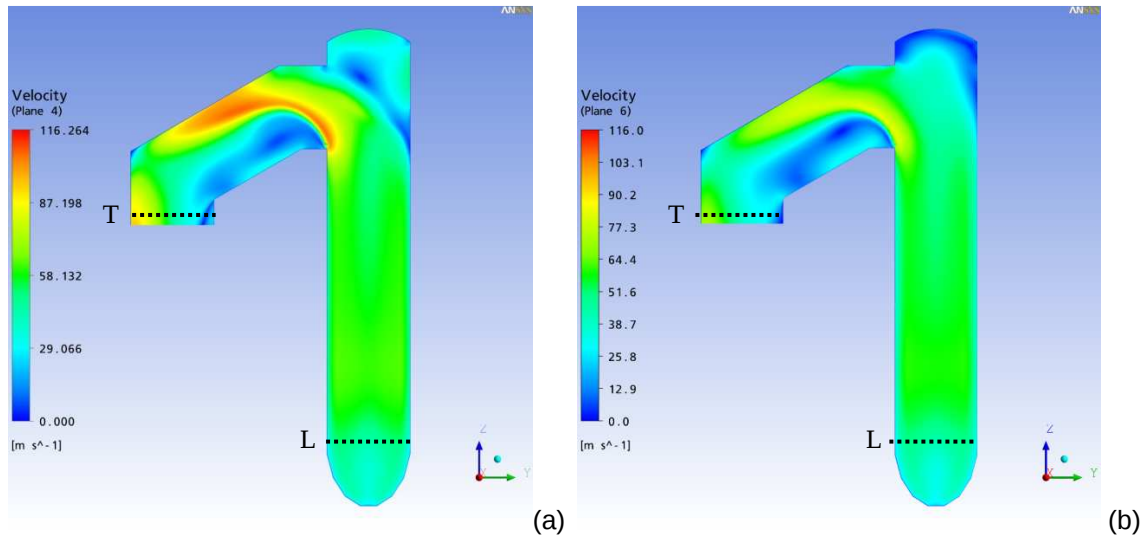


Figura 16 – Comparativo de velocidades na seção x-z. (a) Caso 1 e (b) Caso 2.

As Figuras 18(a) e (b) mostram a variação de temperatura ao longo do escoamento nos planos x-z e y-z respectivamente. Nota-se que existem grandes gradientes de temperatura com diferentes variações em diferentes regiões, evidentemente, correlacionados com a velocidade. Os resultados do campo de temperatura obtidos na simulação computacional, não estão em comum acordo com o que ocorre no equipamento. A temperatura de saída, registrada pelas medições de campo durante operação da coifa (ponto de aferição indicado na Figura 18), indica um valor próximo a 750° C, porém na simulação esse valor está em torno de 1350° C. Tal fato pode ser justificado pela influência da área total de transferência de calor. Como mencionado no Capítulo 2, o modelo computacional não considera a ondulação da tubulação de refrigeração que representa uma área de contato com o gás acima de 50% em relação à área do modelo.

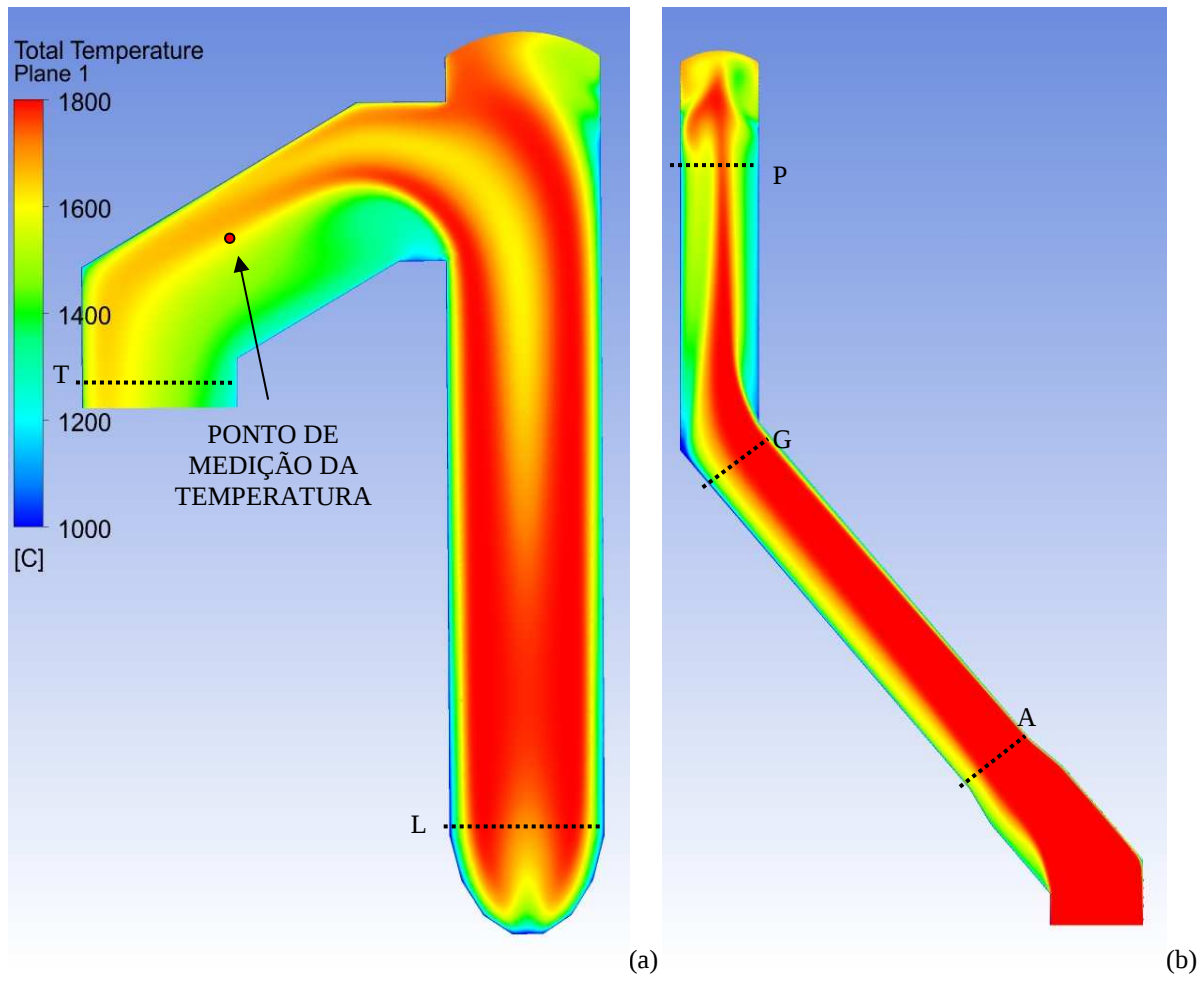


Figura 17- Temperaturas no caso 2 para as seções:(a) x-z e (b)y-z.

4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste capítulo são descritas as principais conclusões acerca do estudo realizado com este projeto de graduação. Além disso, são sugeridas recomendações para futuros trabalhos visando o aperfeiçoamento dos resultados obtidos através das técnicas utilizadas neste estudo e maiores avanços na área de simulação computacional de escoamento em coifas de despoeiramento.

4.1 Conclusões

Neste projeto foram analisadas as simulações numéricas de um modelo computacional simplificado da coifa do despoeiramento primário do convertedor 02 da aciaria da ArcelorMittal Tubarão. O modelo computacional utilizado foi baseado nas equações da conservação da continuidade, da conservação de quantidade de movimento e conservação de energia que foram calculadas numericamente através do método dos volumes finitos. A turbulência é modelada através do modelo k- ϵ . Devido à alta complexidade da geometria real da coifa e a limitação de recursos computacionais foram adotadas simplificações do processo. Foram realizados três testes de malha na geometria e comparados entre si, optando pela malha de 2 milhões de nós como sendo a mais próxima da solução convergida. As simulações foram feitas sob dois casos diferentes, Caso 1 e o Caso 2, em que são variadas as condições de contorno. Em um primeiro estudo foi comparada a simulação da coifa no Caso 1 com os relatórios de troca de painéis e manutenção da coifa, visando identificar os possíveis mecanismos de falha que ocorrem em determinada localização. Em um segundo estudo foi comparado a influência da variação de temperatura, gerada por troca térmica com a parede da tubulação, no perfil do campo de velocidades.

No primeiro estudo foram identificadas regiões onde o escoamento teve um comportamento que propicie falhas e então algumas hipóteses sobre os fenômenos causadores de falhas foram levantadas. No perfil do campo de velocidades foi observado um alto descolamento da camada limite em todas as curvas do percurso do fluido, que geram zonas de baixa pressão e recirculação. Foi observada também uma zona de baixa velocidade na parte inferior da rampa.

Suspeita-se, ao comparar estas zonas críticas com o histórico de manutenção do equipamento, que existe quatro mecanismos com potencial de falha.

No primeiro mecanismo o fluido em recirculação, levando em consideração a alta concentração de particulado e a ação da gravidade, gera uma zona de erosão constante. Levando o equipamento à falha quando esta erosão perfura a parede do tubo. Este mecanismo foi identificado na parte interna após curva da coifa móvel e no lado externo após rampa da coifa fixa.

No segundo mecanismo ocorre também em zonas de recirculação é o de material agregado à parede. Suspeita-se que pelas características do material em suspensão, e a alta temperatura do fluido ocorra uma aglomeração do material particulado gerando blocos de material que aderem na parede formando um obstáculo para o escoamento, assim como, dificulta a transferência de calor do gás para a parede.

No terceiro mecanismo é gerado pela baixa velocidade na parte inferior da rampa da coifa fixa. Neste mecanismo o material perde energia cinética ou por colidir na curva da seção HL ou por falta de velocidade para o arraste, escorre pela rampa. As características de erosão deste são semelhantes ao primeiro.

O quarto mecanismo ocorre pela erosão direta. O fluido em alta velocidade colide com a parede da coifa, desgastando a mesma. Este mecanismo é de fácil previsão e monitoramento e ocorre nas parte superior das seções QRS, I e na curva externa da coifa móvel.

No segundo estudo foi verificado que a temperatura do gás LDG influencia no perfil do campo de velocidades do escoamento na coifa. Foi atribuída esta influência à variação de densidade sofrida pelo fluido durante o resfriamento.

Os resultados foram satisfatórios, visto que qualitativamente foram condizentes com os dados relatados na análise dos relatórios de manutenção. Porém quantitativamente os resultados foram insatisfatórios. Uma análise feita na temperatura do modelo computacional aponta que está muito acima do dado demonstrado na Tabela 1, para um mesmo ponto de aferição, ou

seja, a convecção somente não foi capaz de retirar calor do gás suficientemente para resfriar à temperatura de 750 °C . Isto supostamente é atribuído às simplificações da área e desconsideração da radiação.

4.2 Considerações para trabalhos futuros

Conforme descrito na seção 4.1, os resultados apresentados de um melhor aperfeiçoamento para uma melhoria na representação dos fenômenos de transportes em coifas de despoeiramento. Foram ressaltados fatores relevantes acerca da modelagem realizada neste trabalho, que necessitam de uma investigação mais aprofundada, são eles:

- A geometria do modelo: como relatado neste trabalho, a área de troca térmica real em relação ao modelo computacional é quase 55% maior. Portanto com isso espera-se que por consequência desta diferença de área, a contribuição da troca térmica por convecção foi muito abaixo da real;
- A radiação: mesmo com uma área maior, a quantidade de calor transmitida por convecção não seria suficiente para retirar a quantidade necessária de calor do fluido para que este chegue à temperatura aferida em campo. Segundo tese baseada em caldeiras flamo – tubulares defendida por Galarça (2006), concluiu-se que quanto maior o diâmetro da tubulação de gás, menor é a quantidade de calor transferido por convecção e maior a por radiação, podendo o segundo ser maior que o primeiro para tubulações maiores que 2 metros de diâmetro. Com isso levando em consideração a temperatura do gás e o diâmetro da tubulação, suspeita-se que esta tenha sido a simplificação que mais tem influência na temperatura final;
- Perfil de entrada: o perfil de entrada da coifa móvel leva em consideração vários fatores como o comportamento do banho durante o sopro, a entrada de ar falso, o ângulo de operação do convertedor. Este perfil de escoamento influencia possivelmente apenas na coifa móvel, pois na saída de coifa móvel há um difusor que diminui os efeitos do perfil de entrada;
- Estudar propriedades radiativas do gás LDG e simular o escoamento, analisando a interferência da radiação no perfil de temperatura e velocidade.

- Analisar características como granulometria e fluxo de particulados exauridos pela coifa, para assim poderem ser considerado.
- Simular o escoamento completo levando em consideração todos os parâmetros. Estas considerações exigem uma carga computacional indisponível no cenário da computação atual.

5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Adams, Richard W. **BOF Steelmaking** . 1974.

ANSYS Corp. **CFX Solver Theory Guide**. 2006.

Assunção, Charles, Geraldo Augusto C. França, e Cesareo de La Rosa Siqueira. **“Blast Furnance Air Pre-Heater Gets a Thermal Boost.”** 2007.

Berger, K. **"CFD simulation of the carbon dust combustion in the COREX melter gasifier."** Steel Research International, ago 2008: 579-586.

Boussinesq, J. **Essai sur la theorie des eaux courantes**. Memories presents par divers Savants a l'Academie des Sciences de l'Institut de France. França, 1968.

Curbani, Flávio. **“Estudo Da Dispersão De Poluentes Na Atmosfera Ao Redor De Um Prédio Isolado Através Da Simulação Das Grandes Escalas.”** Vitória - ES, 2004.

Davidson, P. A. **Turbulence: An Introduction For Scientists and Engineers**. Oxford: Oxford University Press, 2004.

Decker, Koerich Rodrigo. **“Modelagem e Simulação Transiente do Escoamento Gás-Sólido.”** Campinas - SP, 2003.

Furtado, Rômulo Góes, e Ennio Rodrigues da Costa. **Simulação Computacional do Escoamento de Gases na Coifa da Aciaria da CST**. 2007.

Galarça, Marcelo Moraes. **Transferência de calor combinando radiação e convecção no interior de dutos de geradores de vapor flamotubulares**. 2006.

Hou, Qinfu, e Zongshu Zou. **“Comparison between standard and renormalization group k-e models in numerical simulation of swirling flow tundish.”** ISIJ International, 2005.

Launder, B. E., and D. B. Spalding. **The numerical computation of turbulent flows**. Vol. 3. 1974.

Launder, B. E., e B. I. Sharma. **“Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc.”** Letra in Heat and Mass Transfer, 1974.

Lucas, T., E. Harbers, P. EP Davies, and J. Mack. **"The application of computational modeling to environment issues through the steel processing route."**

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.

Patankar, S. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.** USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

Peters, Tim. **"Simulation of multifase flow in the steelmaking industry."** ICMF. Germany, 2007.

Phillips, Duncan, and Carlos de Almeida. **"Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling In Prolonging Hood Life."** AISE - Prolonging BOF Hood Life. Nashville, TN, 1998.

Rizzo, Ernandes Marco da Silveira. **Noções Básicas de Siderurgia.** Vitória - ES, 2004.

Roldan, David et al. **"Three-dimensional CFD analysis for blast furnace hearth wear."** ISIJ International 46, no. 2 (2006): 257-266.

Santos, J. M. **"Flow and Dispersion Around Isolated Buildings."** England, 2000. 257.

Schien, Du, and Par Jonsson. **"A New Approach to model sulphur refining in a gas-stirred ladle-A coupled CFD and thermodynamic model."** ISIJ International 38 (1998): 260-267.

Schlüter, J, e N.(SMS Demag AG) Vogl. **"Application of computational fluid dynamics to steelmaking process."** ATS International Steelmaking Conference. Paris, 2007.

Versteeg, H. K., and W.. Malalasekera. **An introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method.** Longman Scientific & Technical, 1995.

ANEXO A - PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO

Basicamente, o processo siderúrgico pode ser dividido em 4 (quatro) etapas (Rizzo,2004) que podem ser visualizadas na figura B.1: preparação da carga, redução, refino e laminação.

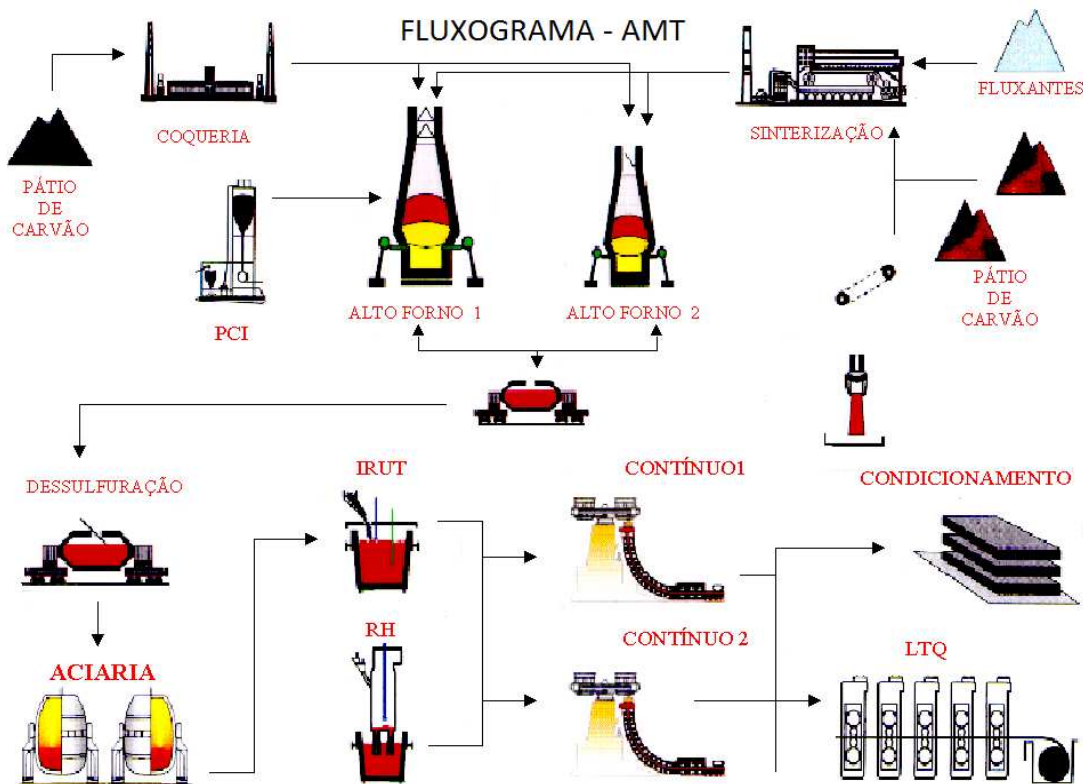


Figura A. 1 – Fluxograma da AMT

Fonte: AMT (2009)

Durante a primeira etapa de preparação da carga ocorre um processo de aglomeração de materiais finos (calcário, minério de ferro e outros) chamado de sinterização. O resultado desse processo é um produto denominado sinter, que é uma fonte metálica para carregamento dos alto-fornos. Já o carvão é processado na coqueria e transforma-se em coque.

Na segunda etapa de redução as matérias-primas preparadas são carregadas no alto forno. O ar pré-aquecido a uma temperatura de aproximadamente 1000°C é soprado pela parte de baixo do alto forno. O coque associa-se ao oxigênio que se desprende do minério com a alta temperatura, deixando livre o ferro, produzindo calor que funde a carga metálica e dá início

ao processo de redução do minério de ferro, transformando-o em um metal líquido: o ferro-gusa. O gusa é uma liga de ferro e carbono com alto teor de carbono.

A terceira fase é processo de transformação do gusa em aço, que consiste em diminuir os teores de carbono, silício, fósforo, enxofre e nitrogênio e adição de elementos de liga para conferir as propriedades desejadas.

A quarta fase do processo de fabricação do aço é a conformação e laminação. O aço líquido, é solidificado em forma de tarugos ou placas para posterior laminação. Após solidificado, o aço é deformado mecanicamente por equipamentos denominados laminadores, que o transforma em produtos siderúrgicos semi-acabados, como chapas grossas e finas, bobinas, vergalhões, arames, perfilados, barras.

Em uma planta siderúrgica, uma parte da produção de gusa é transportada para fornos básicos a oxigênio (BOF), mais comumente conhecidos como convertedores, para produzir o aço líquido. O convertedor é um vaso em forma de barril revestido internamente de material refratário com capacidades de até 400 toneladas e temperaturas de banho 1800°C. Uma lança sopra oxigênio puro na superfície do metal fundido, que por oxidação ajuda a remover elementos secundários contidos no banho como carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre. Uma mistura mais eficiente é auxiliada pela injeção de um gás inerte como nitrogênio ou argônio. Todos estes gases injetados e o resultado das reações de oxidação e parte da combustão do monóxido de carbono são captados por uma coifa de resfriamento e lavagem de gás, para que possa ser reutilizado em outros processos. Estas reações produzem muito calor e grande quantidade de gases e poeira. Na figura A.2 é mostrado uma visão esquemática do processo da aciaria.

A ArcelorMittal Tubarão (AMT), antiga Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), está localizada nos municípios de Serra e Vitória no estado do Espírito Santo. A Companhia é líder mundial na produção de semi-acabados de aço, principalmente placas de aço. No ano de 2003 iniciou uma nova fase de expansão com a inauguração do seu moderno Laminador de Tiras a Quente (LTQ), visando principalmente o mercado interno.

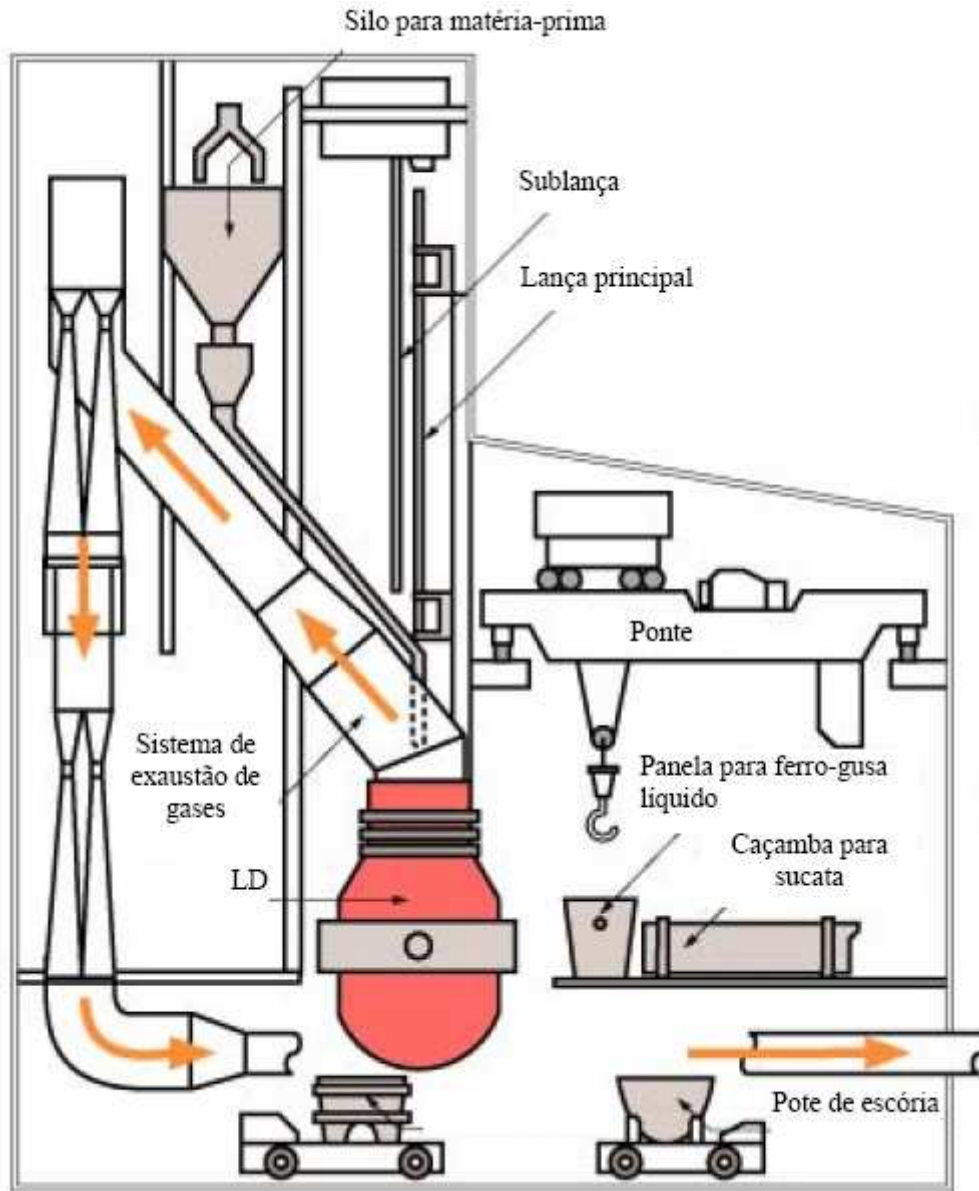


Figura A. 2 – Representação esquemática de Operação da Aciaria.

DEFINIÇÕES EM ACIARIA

A escória de aciaria é um subproduto da produção do aço. Este material é portanto resultado da agregação de diversos elementos que não interessam estar presentes no material aço. Tem como características marcantes ser composta de muitos óxidos, como CaO e MgO e ser expansível, devido às reações químicas desses óxidos..

ANEXO B - DESCRIÇÃO DA COIFA DE DESPOEIRAMENTO PRIMÁRIO

B.1 Sistema de Resfriamento de Gases

A coifa é um componente de conexão entre o convertedor e o sistema de lavagem de gases. Está localizada acima da boca do convertedor para permitir melhor captação dos gases, os quais, através da coifa fixa, são encaminhados para a torre de depuração onde acontece a primeira fase de saturação, com água. Esta depuração tem a função de resfriar o gás da temperatura em torno de 800°C à 80°C. A adequada operação do sistema da saia móvel, mantendo sua abertura menor possível, favorece todo o sistema de exaustão assim como contribui para melhor qualidade do gás. Basicamente, o sistema de resfriamento de gases de uma aciaria é constituído pelos seguintes equipamentos: Sistema de tratamento de gases, saia móvel, coifa móvel e fixa conforme o arranjo geral na Figura B1.

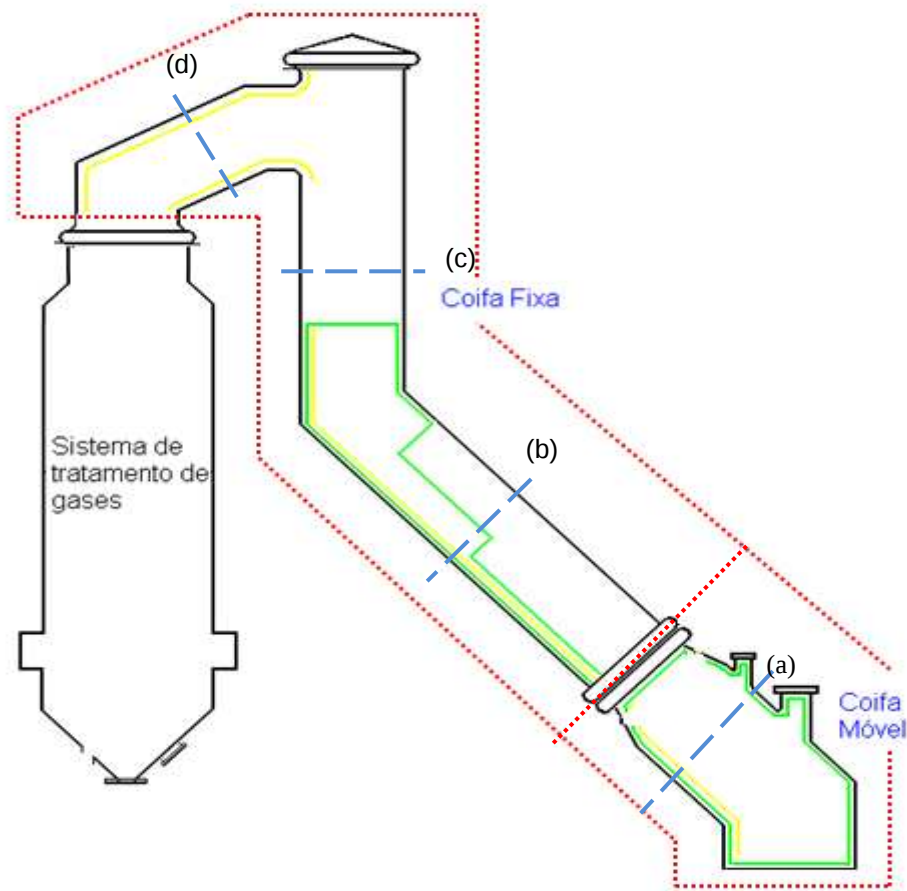


Figura B. 1 - Sistema de resfriamento de gases demonstrando informações de setores e pontos de referência para o trabalho. As linhas tracejadas são as linhas onde foram gerados os perfis de velocidade para comparação entre as três malhas testadas.

Fonte: AMT (2003).

Tabela B. 1 - Dados termo-físico da Coifa Fixa

Construção dos painéis	10 tubos
Construção da coifa	(poligonal) 16 painéis
Temp. da entrada dos gases	1800 °C
Temp. da saída dos gases	750 °C
Temp. máx. água entrada	95 °C
Temp. máx água saída	110 °C
Peso	66 t
Pressão de água	21 a 23,35 bar
Vazão de água	1600 m ³ /h

Altura	20,80 m
Diâmetro externo dos tubos	51mm
Espessura dos tubos	5 mm
Diâmetro na condição fria	3254 - 3192 mm
Comprimento na condição fria	42m
Dilatação máxima	70mm
Vazão dos gases	163000 Nm3/h
Pressão dos gases dentro da coifa	5 a 0 mmH2O

Fonte: Campanha Refratária 2003 AMT (2003)

Tabela B. 2 - Comparativo De Reparos Previstos E Programados Na Coifa

ITEM ¹	PREVISTA	REALIZADA	TUBOS ²
Região A	10	22	044 e 045 071 a 090
Região G	-	4	004 a 006
Entrada da CM	-	4	120 a 123
	-	10	120 a 129
Coifa Móvel(CM)	-	5	133 a 137
	-	4	104 a 107
Região HL	-	4	159, 002, 004, 005
Região Q	-	20	046 a 055 056 a 065
Região T	-	6	067 a 072

Fonte: AMT, relatório de final de Campanha do Convertedor n ° 02(2003)

¹ Vide esquema de divisão em seções da coifa fixa na figura B.2

² Vide esquema de identificação dos tubos de refrigeração da coifa fixa na Figura B.4.

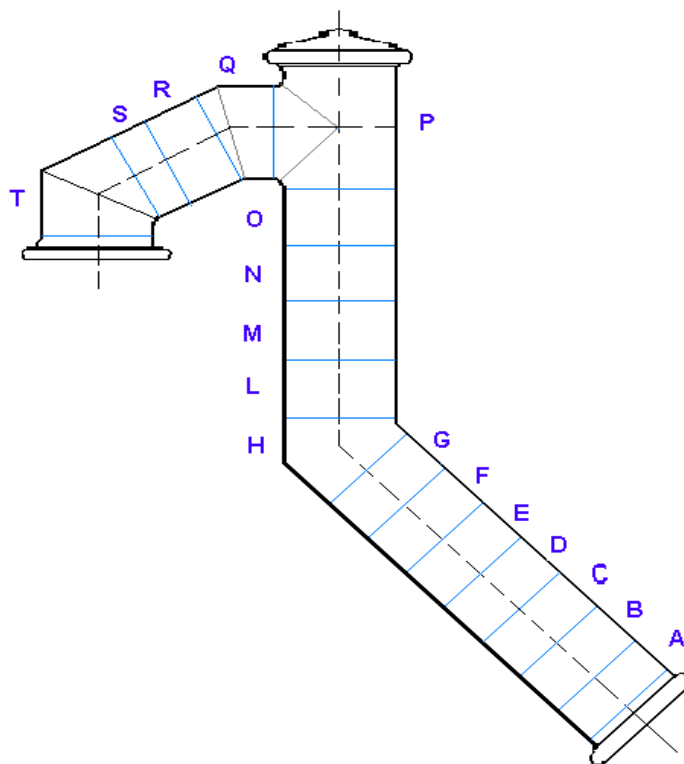


Figura B. 2 - Esquema de divisão em seções da coifa fixa.

Fonte: AMT (2009)

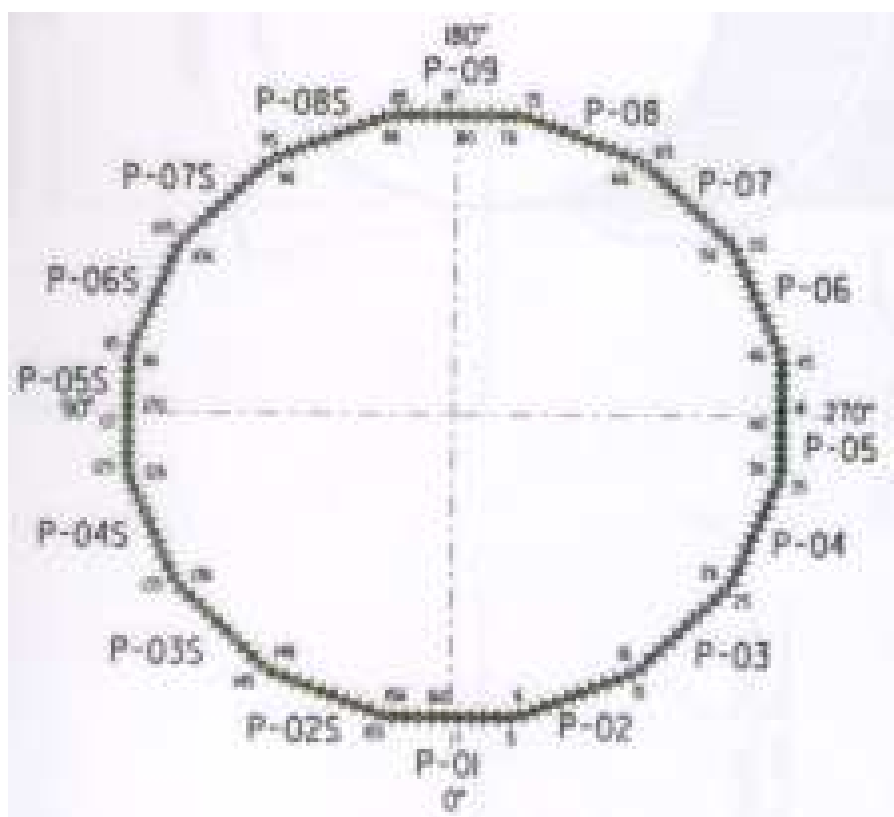


Figura B. 3 - Esquema de identificação dos tubos de refrigeração da coifa fixa.

Fonte: AMT (2009).

Tabela B.3 – Especificação Técnica do Sistema de Despoeiramento Primário

SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO PRIMÁRIO		
Fornecedor		IT./Baumco
Volume de gás	Nm ³ /h	192.000
Diâmetro da Saia	mm	4.584
Diâmetro da C. Móvel	mm	3.769
Diâmetro da C. Fixa	mm	3.254
Velocidade na Saída da C. Fixa	m/s	29,9
Diâmetro da C. Fixa	mm	3.254
Área C. Fixa	m ²	8,32
Temperatura na Saída da C. Fixa	C	1000,0

Fonte: Relatório técnico fornecido pela Kawasaki (2002)

Tabela B.4 – Especificação Técnica do convertedor 02 da aciaria da ArcelorMittal Tubarão

CONVERTEDOR 02		
Fornecedor		SMS Demag
Tempo entre corridas	min	40
Corridas por dia		45
Capacidade	t/heat	315
Vazão de O ₂	Nm ³ /h	66.000
Operação		1/2
Diâmetro da Boca	mm	3.650

Fonte: Relatório técnico fornecido pela Kawasaki (2002)

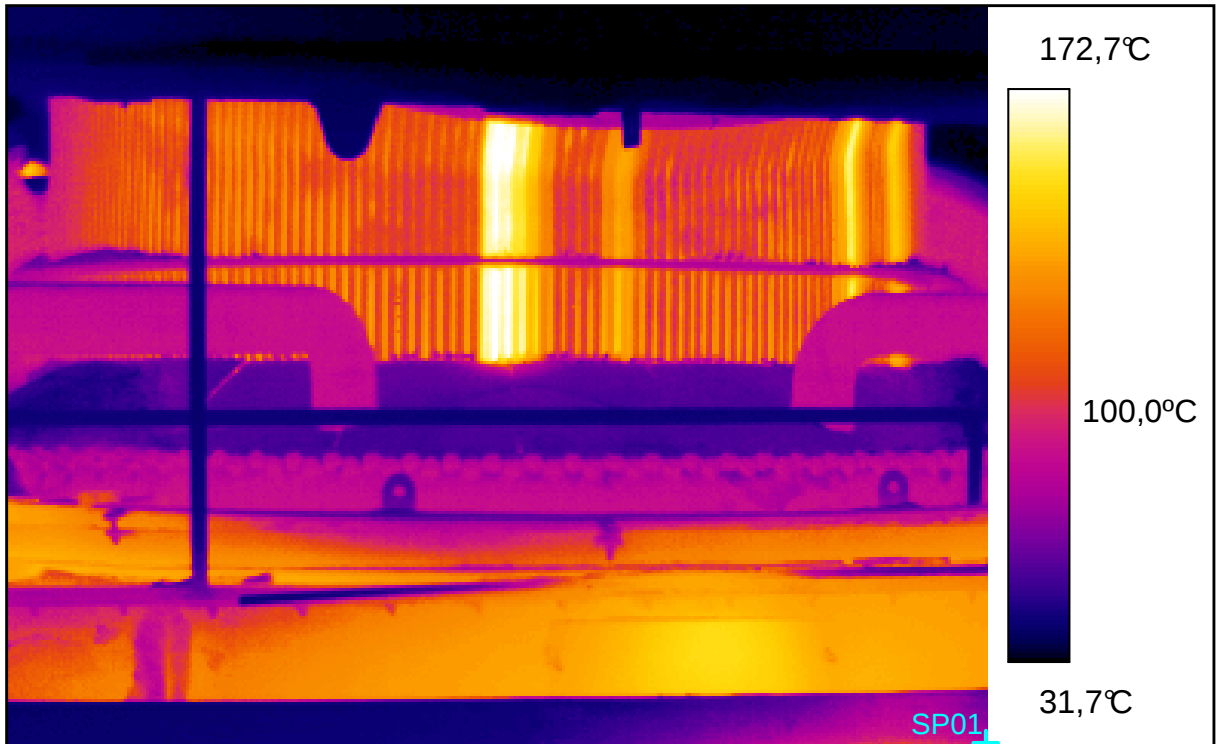


Figura B. 4 - Termografia realizada no dia 31/07/2007 às 15h na coifa móvel e fixa do convertedor 1.

Tabela B.5 – Composição do gás LDG em proporção de massa

<i>ELEMENTO</i>	<i>PROPORÇÃO EM MASSA</i>
CO	69 %
CO ₂	15,4 %
N ₂	16,5 %
H ₂ O	0 %
N ₂	0%

Fonte: Contract technical specification of gas recovery system (2002)