

ANÁLISE DE FALHA E RENGENHARIA DOS DUTOS MÓVEL E INCLINADO DA ACIARIA EAF *

*Fabício Silveira Garajau¹
Marcelo de Souza Lima Guerra²
Paulo Marcelo Rodrigues³
Thiago Pinto Wandekoken⁴*

Abstract

Com o mercado siderúrgico mundial cada vez mais competitivo, a busca pela redução de custos passou a abranger, além da matéria prima, também os equipamentos utilizados no processo de fabricação e processamento do aço. Neste contexto, o uso de ferramentas de simulação computacional CFD (*Computational Fluid Dynamics*) se torna cada vez mais comum em pesquisas, desenvolvimentos e inovação dos equipamentos utilizados no processo. Os Dutos Móvel e Inclinado são equipamentos refrigerados a água que compõe o sistema de despoeiramento do Forno Elétrico a Arco (EAF) de 100 t da Arcelor Mittal Sul Fluminense (AMSF). Estes equipamentos apresentaram falhas prematuras, gerando paradas para manutenções corretivas. No presente trabalho, as regiões de falha foram identificadas e os mecanismos caracterizados, como sendo fadiga térmica com trinca nucleada por um pit de corrosão. Com o auxílio de simulação computacional CFD verificou-se a correlação destas regiões com uma deficiência na distribuição de água de refrigeração dos circuitos tubulares. **A partir desta informação, os circuitos foram redistribuído, objetivando melhorar a troca térmica do equipamento nestas regiões. Como principais conclusões, pode-se comprovar a efetividade da metodologia proposta para reengenharia dos equipamentos, visto o aumento considerável na vida útil.**

Keywords: (EAF, redução de custo, despoeiramento, CFD, análise de falha).

¹ Sócio da ABM; Mestre e Eng. Mecânico e Pesquisador da Lumar Metals. Ipatinga/MG, Brasil;

² Sócio da ABM; Mestre e Eng. Mecânico e Pesquisador da Lumar Metals. Ipatinga, MG, Brasil;

³ Gerente Geral de Tecnologia e Engenharia da Arcelor Mittal Sul Fluminense, Resende/RJ, Brasil;

⁴ Sócio da ABM; Mestre e Engenheiro de Aplicações da Lumar Metals, Cariacica/ES, Brasil.

1 INTRODUCTION

O sistema de despoeiramento é composto por um conjunto de dutos que são responsáveis pela captação dos gases e fuligens gerados durante o processo de refino do aço em aciarias elétricas. Estes equipamentos também tem como função o resfriamento dos gases para reaproveitamento em outros processos [1]. A exaustão primária é o mais importante ponto de captação do despoeiramento e onde acontece a maior parte da exaustão da Aciaria. Aproximadamente 90% do que o despoeiramento capta e faz a exaustão, vem desse ponto do equipamento. É nesse trecho que ocorrem a maior troca térmica do gás, maior acúmulo de material particulado de maior densidade, sendo também o local onde acontece a queima do monóxido de carbono (CO) gerado pela combustão do ar succionado do ambiente. A Figura 1 apresenta esquematicamente o sistema de despoeiramento do FEA da AMSF, sendo possível um melhor entendimento da posição de trabalho dos dutos Móvel e Inclinado.

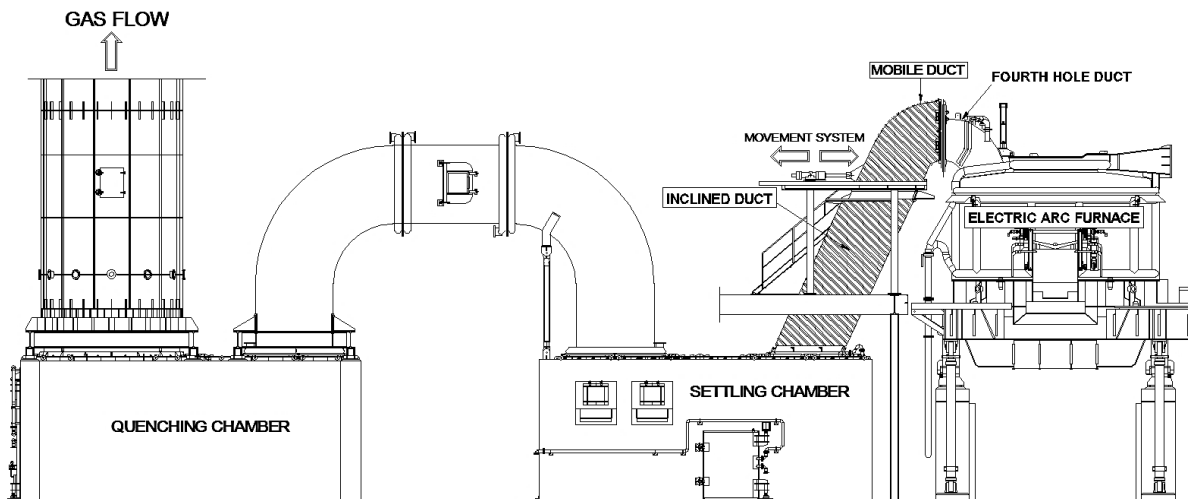


Figura 1: Desenho esquemático do sistema de despoeiramento da AMSF.

Pode-se observar na Figura 1 que a exaustão primária começa no duto do 4º furo da abóbada, entretanto, é considerado o início do sistema despoeiramento o trecho a partir Duto Móvel, seguindo até a exaustão secundária que capta os gases oriundos da Coifa, que juntos formam a exaustão principal. Os dutos Móvel e Inclinado são os primeiros equipamentos do despoeiramento a ter contado com o gás. O duto Móvel está instalado logo a frente do Elbow (cotovelo fixo do EAF), já o duto Inclinado está localizado logo abaixo do duto Móvel. O duto Móvel tem esse nome por ter suas bases instaladas sob dois carros que possibilitam que ele avance e/ou recue conforme “set point” pré-estabelecidos e acionados por um circuito hidráulico. Isso possibilita o controle de entrada do ar falso succionado do ambiente. Já o nome do duto Inclinado caracteriza sua posição de montagem. O material utilizado na fabricação destes dutos é o tubo sem costura com diâmetro de 3 polegadas, schedule 80, conforme norma ASTM A-106 grau B.

A estimativa de vida útil do projeto original destes equipamentos era de 19200 corridas, sendo o mecanismo de falha previsto o desgaste por abrasão. Porém a vida média atual destes equipamentos está por volta de 6500 corridas, aproximadamente 10 meses. A substituição dos dutos Móvel e Inclinado na aciaria da AMSF envolve uma grande quantidade de recursos, tanto de mão de obra, de

equipamentos e de tempo. Historicamente estas trocas duram de 2 a 3 dias, sendo necessária a utilização de guindastes no manuseio dos equipamentos, desmontagem dos equipamentos usados e montagem dos novos. O objetivo inicial da reengenharia dos dutos móvel e Inclinado é o aumento de vida útil para no mínimo 12 meses, conciliando a troca destes equipamentos nas paradas anuais da aciaria e, conseqüentemente, reduzir um custo de até 3 dias da aciaria parada.

No presente trabalho estão apresentados os estudos de análise de falha, realizados para caracterização dos mecanismos de nucleação e propagação das trincas, os cálculos de reengenharia dos dutos Móvel e Inclinado, auxiliados por simulação CFD, bem como os resultados operacionais obtidos com a reengenharia destes equipamentos.

2 MATERIALS AND METHODS

Serão apresentados neste capítulo toda fundamentação teórica metodologia e materiais utilizados para realização das análises de falha e simulações CFD de reengenharia dos dutos Móvel e Inclinado.

2.1 Theoretical Foundation

O processo de fabricação do aço em EAF acontece em ciclos, iniciando no carregamento do gusa e sucata, fusão da carga, ajuste de composição química, seguido pelo vazamento de aço e finalmente o vazamento de escória. Esse ciclo denominado *Tap to Tap* (vazamento a vazamento), tem tempo médio de 45 min ^[2], o que caracteriza também o ciclo térmico de trabalho dos equipamentos estudados. Os gases gerados durante a operação também variam sua vazão e temperatura, conforme está apresentado na Figura 2, tem temperaturas acima de 1700 °C e vazão que podem chegar a 600 Nm³/min para um conversor de 130 t ^[3].

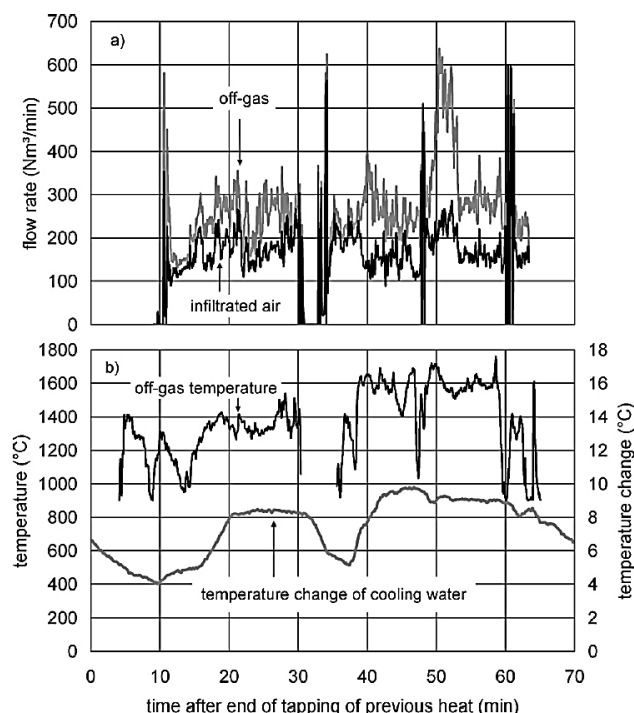


Figura 2: Vazão e temperatura dos gases de processo de um EAF de 130 t ^[3].

O material particulado transportado pelos gases para o despoejamento tem valores na faixa de 9 a 18 kg por toneladas de sucata carregada, podendo também variar em função de práticas operacionais. A composição química do particulado pode conter enxofre oxidado (SO₂), proveniente da queima do carvão injetado no banho durante a operação, onde novamente se oxida pela pós-combustão do ar succionado (SO₃) e combina com o hidrogênio (H) remanescente do ar, tornando-se ácido sulfúrico (H₂SO₄). Este ácido pode se condensar na parede dos tubos, e ter efeitos altamente corrosivos [4]. Neste caso a temperatura de trabalho dos equipamentos torna-se um agravante, pois a taxa de corrosão é governada completamente pelo processo elementar de oxidação do metal, assim, taxa de corrosão aumenta exponencialmente com o aumento da temperatura. Essa relação é refletida na expressão de Arrhenius [5]:

$$r = A \left(\frac{-E}{RT} \right) \quad (1)$$

Onde r - é a taxa de corrosão; A - fator exponencial; E- energia de ativação; R - constante dos gases e T - temperatura absoluta.

A temperatura dos equipamentos também pode agravar os problemas de trinca por fadiga, visto que uma maior temperatura resulta em maior amplitude das tensões térmicas durante os ciclos de operação. Os gases à alta temperatura geram um fluxo de calor na parede externa do tubo, que tem em sua parte interna a refrigeração pela água. Desta forma, quando a superfície externa aquece, a expansão do material é restringida pela refrigeração da superfície interna, portanto, a superfície sofre tensões de compressão. Após o resfriamento, a deformação é na direção inversa, e as tensões de tração podem se desenvolver. Estes ciclos de aquecimento e resfriamento propiciam a fadiga térmica. [6]

Visto a relevância da temperatura no processo de corrosão e fadiga dos dutos, na Figura 3 pode-se observar um resultado de simulação CFD em um sistema de despoejamento de EAF, sendo possível verificar o perfil de distribuição da temperatura ao longo da seção interna dos dutos durante o escoamento dos gases.

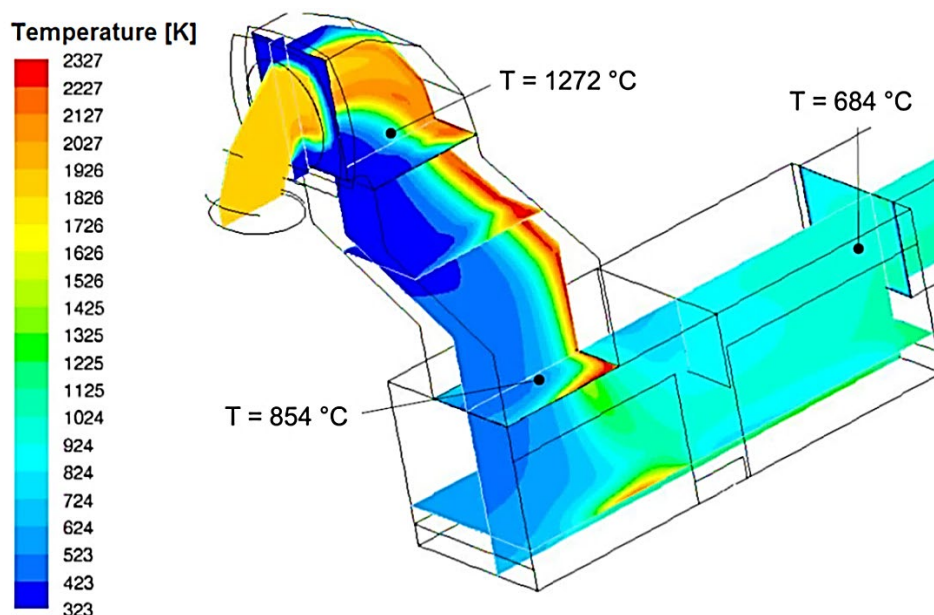


Figura 3: Temperatura de escoamento dos gases no sistema de despoejamento primário [7].

Nota-se que a temperatura dos gases é maior em toda região do costado dos dutos e menor nas laterais e partes frontais. Isso faz do costado a região mais suscetível a problemas de corrosão e fadiga.

2.2 Failure Analysis

Análise de falha é um processo crítico na determinação das causas físicas dos problemas. O processo é complexo e multidisciplinar, onde podem ser utilizadas técnicas diferentes de observação, inspeção e laboratório. Para se realizar uma eficiente e adequada análise de falhas deve-se de forma criteriosa examinar e analisar as evidências para promover uma perspectiva clara e imparcial da causa raiz. Realizar uma adequada análise de causa raiz torna-se imprescindível no processo geral de solução de problemas, sendo o principal parâmetro para corrigir e evitar falhas, atingir níveis mais altos de qualidade e confiabilidade e, por fim, alcançar o desempenho desejado ^[8]. O resultado da análise causa raiz de uma falha em problemas de engenharia é a identificação do mecanismo de falha (exemplo: fadiga, corrosão, fluência, etc). Neste contexto, o processo de resolução de problemas podem seguir os passos do processo apresentado na Figura 4.

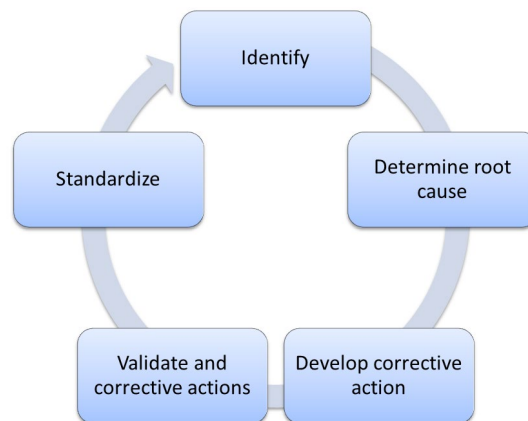


Figura 4: Modelo de análise e solução de problemas ^[8].

Onde:

- Identificar: etapa de identificação do problema, coleta de dados, amostras e avaliação dos impactos de cada uma variáveis na falha.
- Determinar a causa raiz: etapa de analisar o problema para identificar a causa raiz.
- Desenvolver ações corretivas: etapa que visa buscar as possíveis soluções para mitigar e evitar a recorrência do problema.
- Validar as ações corretivas: etapa de teste do produto piloto, avaliação da eficácia e verificação do impacto das mudanças na contenção dos problemas.
- Padronizar: etapa de registro e padronização das melhorias implementadas para fabricação dos novos equipamentos. ^[8]

A metodologia utilizada na reengenharia dos dutos Móvel e Inclinado se baseia no modelo apresentado na Figura 4, onde foram aplicadas todas as etapas proposta no ciclo, iniciando pela análise de falha, reengenharia do equipamento, comprovação da efetividade das alterações e padronização do projeto do para fabricação dos demais equipamentos.

As regiões de trinca e desgaste foram identificadas, conforme apresentado na Figura 5, possibilitando a retirada de amostras para análises de falha e com o objetivando de correlacionar estas regiões com as variáveis existentes no processo.

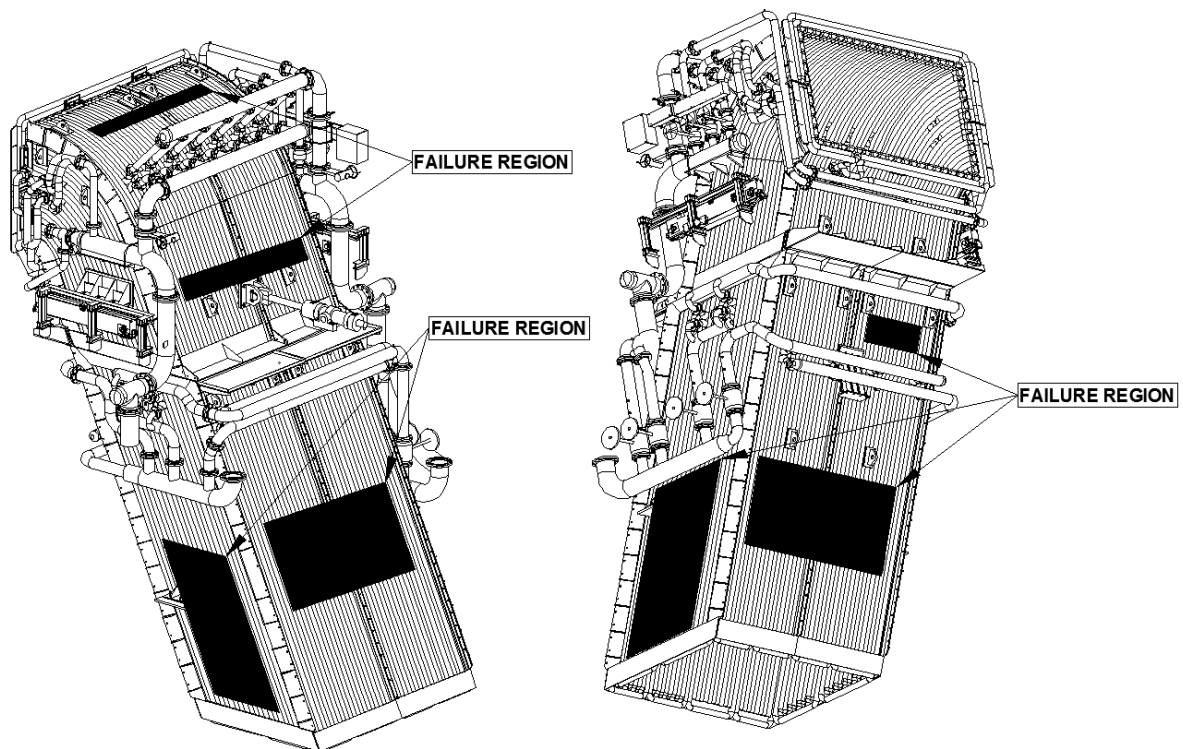


Figure 5: Regiões de falha dos dutos Móvel e Inclinado.

Em todas as regiões de falha apresentadas na Figura 5, observou-se trincas superficiais e que atravessavam a espessura do tubo, além de redução na espessura da parede do tubo. Em uma destas regiões com falha, pode-se retirar um pedaço de tubo com esta falha típica, conforme apresentado na Figura 6a, e a partir deste tubo, retirar amostras menores para análise de composição química e metalografia.

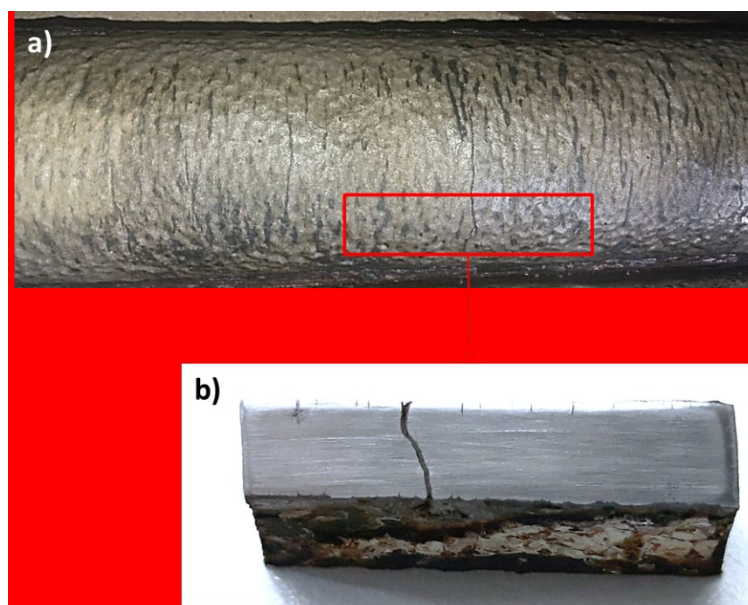


Figura 6: a) Tubo com característica das regiões com trinca para retirada de amostra para análises metalográficas; b) amostra do tubo para análises metalográficas.

A composição química pode ser realizada utilizando Espectrômetro Thermo Fisher Scientific ARL 3460 – 4103. Para análise metalográfica, faz-se necessário a preparação da amostra, lixadas com lixas à base de carvão de silício de 180# a 4000# e polidas com suspensão de sílica coloidal OP-U (*Struers*). Para evidenciar a estrutura granulométrica do aço, utilizou-se ataque químico com reagente Nital 2%, antes da análise em microscópio óptico ^[9].

2.3 Numerical Modeling

O sistema de refrigeração dos equipamentos estudados no presente trabalho, apesar de ser formado por circuito tubular, apresentam grande complexidade no escoamento, visto a influencia dos *manifolds* na distribuição do fluxo. Assim, faz-se necessário a utilização de um modelo matemático que permita a avaliação do escoamento em um sistema de coordenadas tridimensional. Em função disto, para este caso utilizou-se o software Ansys CFX 14.0, que é um software CFD que se baseia no método de volumes finitos para solução das equações de transporte que regem o escoamento. Este método divide a geometria em volumes de controles infinitesimais, e então resolve numericamente as equações de transporte para cada princípio físico ^[10].

As equações de transporte a serem resolvidas no modelo CFD para caso estudado são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Equações de conservação para a fase gasosa ^[10].

Massa	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m$	∇ - derivada espacial em um sistema de coordenadas. ρ - densidade \vec{v} - velocidade S_m - massa adicionada na fase contínua
Momento	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$	$\rho \vec{g}$ - forças gravitacionais. \vec{F} - forças externas. $\bar{\tau}$ - tensor de tensões.
Energia	$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v h_{tot}) - \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (vT) + v \cdot S_m + S_e$	$\nabla \cdot (v \cdot \tau)$ - trabalho das tensões viscosas $v \cdot S_m$ - trabalho devido às forças de momento (h_{tot}) - entalpia total
Cinética Turbulenta (K)	$\frac{\partial (\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \vec{v} K) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho \omega K + P_{kb}$	ρ - densidade \vec{v} - velocidade P_k - turbulência devido às forças viscosas β' - constante σ - constante
Dissipação Turbulenta (ω)	$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \vec{v} K) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b}$	ρ - densidade \vec{v} - velocidade P_k - turbulência devido as forças viscosas β' - constante σ - constante

2.4 Mathematical Modeling

Em função das dimensões do equipamento, quantidade de variáveis envolvidas no processo e exigências computacionais, faz-se necessário a restrição do domínio e variáveis a serem simuladas. Desta forma, o domínio das simulações será delimitado ao escoamento do fluido nos circuitos de refrigeração dos dutos, com o objetivo de verificar os pontos de maior e menor velocidade nos circuitos, além dos coeficientes de convecção forçada resultante. Estas informações possibilitam avaliar a eficiência da refrigeração e os pontos de maior e menor troca térmica, e desta forma, correlacionar com as regiões de falha para auxílio na caracterização do mecanismo de falha.

Conforme pode ser visto na Figura 5 os manifolds de entrada e saída dos circuitos possuem várias válvulas para controle da vazão dos circuitos. A perda de carga imposta pelas válvulas será considerada no modelo como um diâmetro equivalente, propiciando a mesma perda de carga, utilizando as equações para o cálculo da perda de carga por fricção ^[12].

$$E_f = \frac{1}{2} e_f V^2 \quad (2)$$

Onde E_f - perda de carga por fricção; e V - velocidade média de escoamento; e_f - fator de perda por fricção e pode ser determinado pela Equação 3.

$$e_f = 0,45(1 - \alpha) \quad (3)$$

Em que α relaciona as áreas do diâmetro maior e menor do escoamento.

$$\alpha = \frac{A_{\text{maior}}}{A_{\text{menor}}} \quad (4)$$

A Figura 7 apresenta a geometria utilizada para as simulações CFD do duto Móvel, onde se observa os *manifolds* de entrada e saída para distribuição da água de refrigeração nos circuitos independentes, bem como as simplificações das válvulas por diâmetros equivalentes.

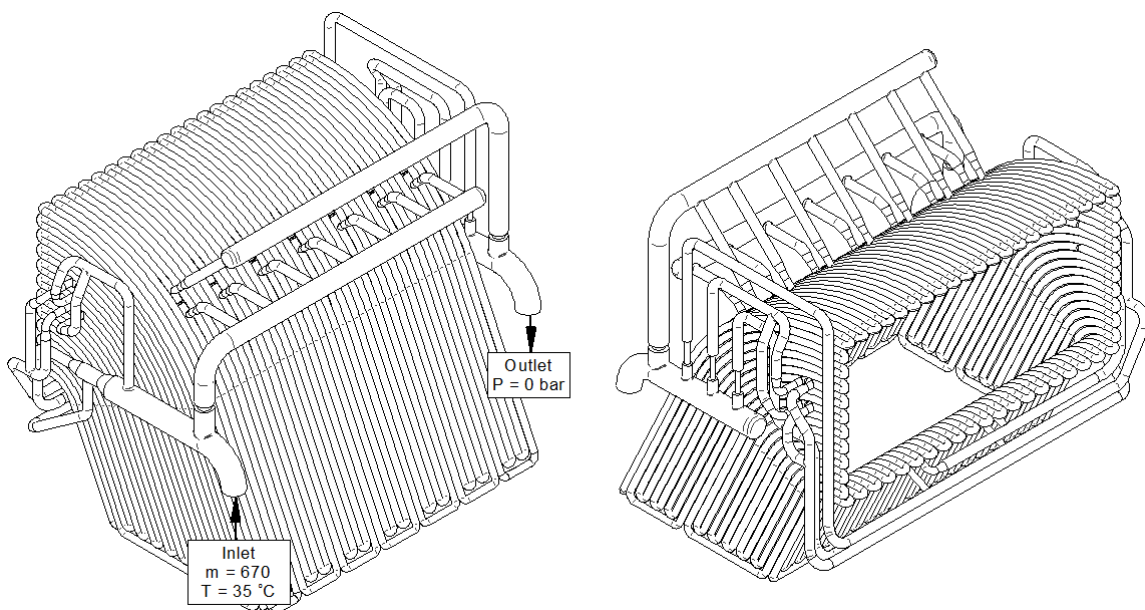


Figura 7: Geometria utilizada para a simulação do duto Móvel que apresentou falha prematura.

A Figura 8 apresenta a geometria utilizada para as simulações do duto Inclinado, onde as válvulas de controle de vazão também foram simplificadas com um diâmetro equivalente.

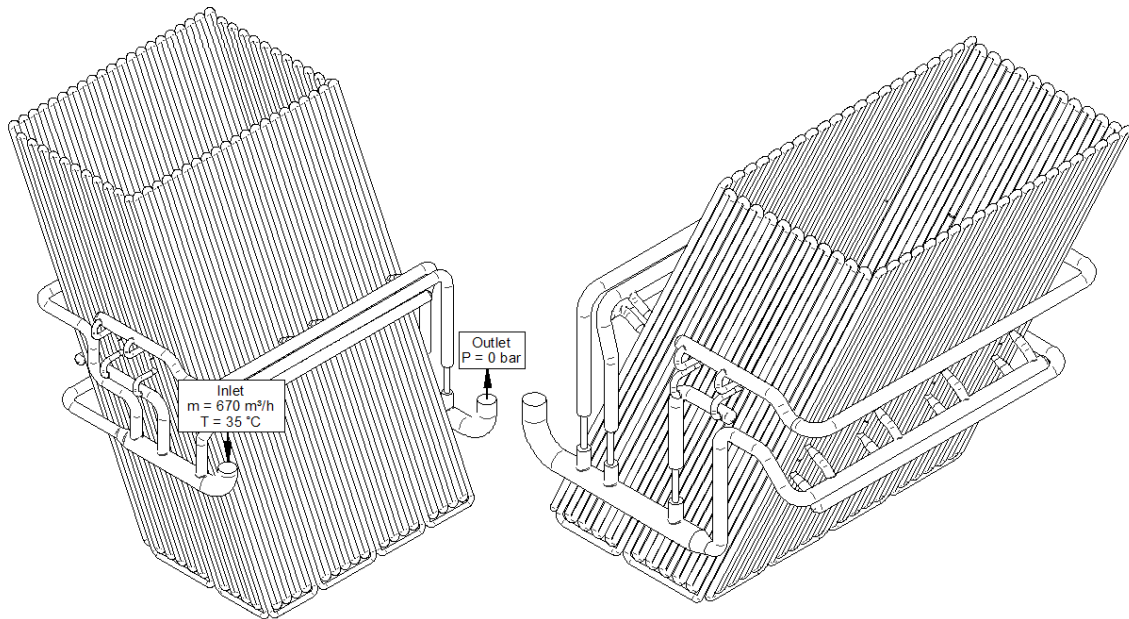


Figura 8: Geometria utilizada para a simulação do duto Inclinado que apresentou falha prematura.

Os resultados das simulações com geometrias apresentadas nas Figuras 7 e 8 fundamentaram a reengenharia dos dutos, sendo mantidas as dimensões externa e posição das conexões de entrada e saída dos coletores, porém sendo redistribuídos os circuitos e remodelado os manifolds para preferenciar a refrigeração das regiões com maior aporte térmico. As condições de contorno utilizadas para as simulações CFD estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Condições de Contorno

	Unidade	Duto			
		Móvel falhado	Inclinado falhado	Móvel redimensionado	Inclinado redimensionado
Vazão de água	[m³/h]	670	550	670	550
Temp. entrada de água	[°C]			35	
Rugosidade da parede	[µm]			0.045	
Pressão de saída	[bar]			0	

3 RESULTS AND DISCUSSION

A Tabela 3 apresenta a composição química das duas amostras retiradas de regiões distintas comparadas com a norma, onde se verifica uma pequena variação da composição química. Observa-se que os baixos teores dos elementos de liga como Cobre, Níquel e Cromo, podem ser responsáveis pela baixa resistência do material a corrosão.

Tabela 3: Comparativo de composição química

	C (máx.)	Mn	P (máx.)	S (máx.)	Si (min.)	Cr (máx.)	Cu (máx.)	Mo (máx.)	Ni (máx.)	V (máx.)
ASTM A-106	0,30	0,29 1,00	0,035	0,035	0,10	0,40	0,40	0,15	0,40	0,08
Amostra 1	0,22	0,53	0,014	0,012	0,253	0,021	0,052	0,009	0,039	0,003
Amostra 2	0,16	0,94	0,013	0,002	0,197	0,024	0,001	0,006	0,004	0,003

Na Figura 9 estão apresentados os resultados das análises metalográficas onde se observa que a trinca inicia a partir de um pit de corrosão, caracterizando a corrosão como mecanismo de nucleação. O EAF 3 injetores de carvão montados no painel lateral, e conforme princípios apresentados no capítulo 2.1, o enxofre presente neste material sendo, oxidado resultar na em ácido sulfúrico (H_2SO_4) nas proximidades dos tubos dos dutos ^[3], o que explicaria os pits de corrosão. A redução de espessura verificada na parede dos tubos também indica a presença de corrosão. Outra observação que reforça esta hipótese está relacionada ao fato dos pits de corrosão iniciar na parede externa do tubo, região de contato com os gases do processo. A corrosão pode ter sido agravada por uma maior temperatura do equipamento nestas regiões. Desta forma, pode-se supor que a redução da temperatura de trabalho dos tubos poderia atenuar os efeitos da corrosão.

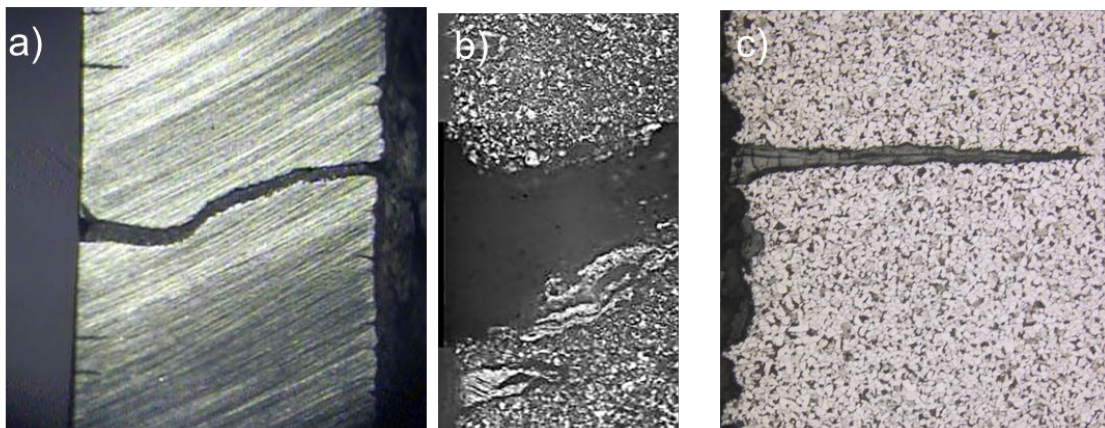


Figura 9: Análise metalográficas: a) macrografia com ampliação de 10 vezes; b) micrografia da região de nucleação da trinca com ampliação de 300 vezes; c) micrografia da região com pit de corrosão ampliada 400 vezes.

A partir dos pits de corrosão a trinca se propaga com características intragranular, ou seja, atravessando os grãos, o que caracteriza a fadiga térmica. Neste caso os ciclos de fadiga correspondem aos ciclos térmicos de operação, onde a amplitude de tensões está correlacionada com a temperatura de trabalho dos tubos. Partindo desta hipótese, a redução da temperatura de trabalho dos dutos tende a reduzir a fadiga térmica e aumentar a vida dos equipamentos.

Comparando as regiões de falha da Figura 5 com a distribuição de temperatura dos gases da Figura 3, observa-se que existem trincas em locais onde a temperatura dos gases deveria ser mais baixa. Em contrapartida, algumas regiões com temperaturas de gases maiores, não foram observadas trincas prematuras. Isso indica uma desproporcionalidade dos circuitos de água, ou uma deficiência dos

manifolds na distribuição do escoamento. Esta observação pode ser mais bem compreendida ao se avaliar os resultados das simulações CFD apresentados nas Figuras 10 e 11, onde estão apresentados os resultados em termos de velocidade e coeficiente de convecção do duto Móvel e Inclinado, respectivamente, que apresentaram falha prematura.

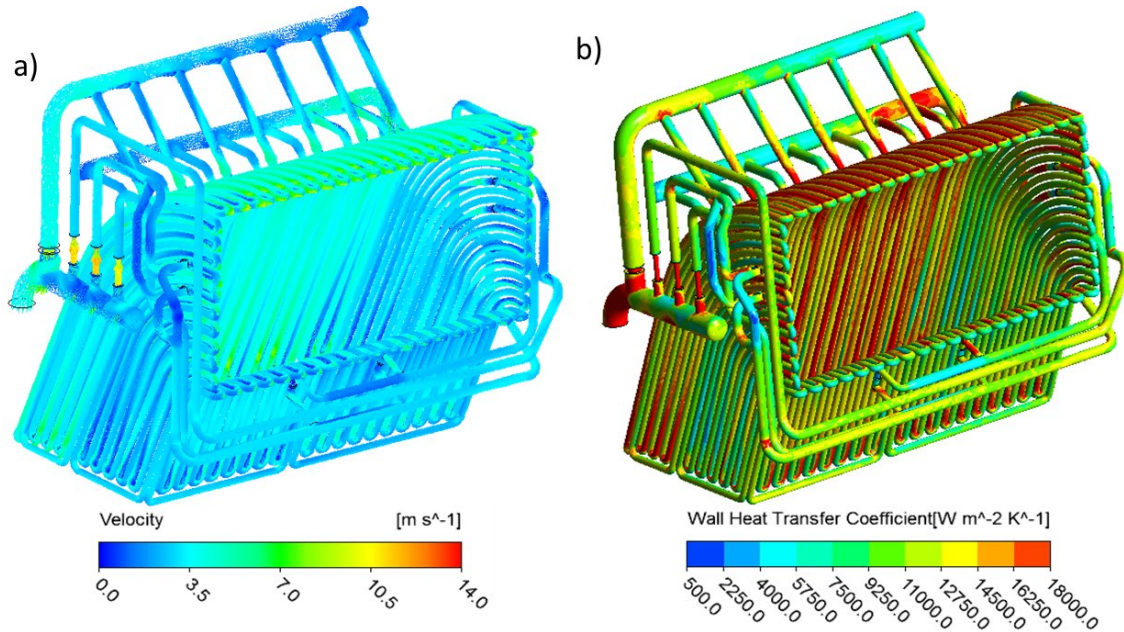


Figura 10: Resultados das simulações CFD do duto Móvel falhado - a) coeficiente de convecção; b) vetores de velocidade.

Verifica-se na Figura 10 que os pontos de baixa velocidade do fluido conferem com os pontos de menor coeficiente de convecção, indicando maior temperatura de trabalho do tubo nesta região. Este fenômeno também pode ser observado na Figura 11, onde se pode correlacionar com os pontos de falha apresentados na Figura 5.

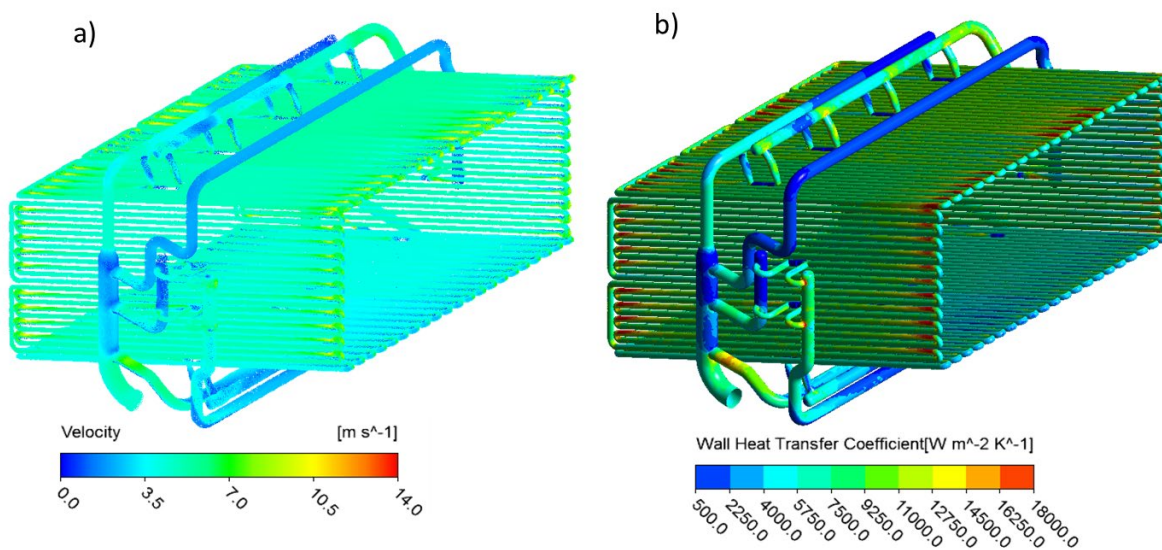


Figura 11: Resultados das simulações CFD do duto Inclinado falhado - a) Coeficiente de Convecção; b) Vetores de velocidade.

É notável que as válvulas de controle de vazão na entrada de cada circuito proporcionem uma grande perda de carga localizada, prejudicando a distribuição para as regiões laterais e inferiores. O projeto original do equipamento possui esta quantidade de acessórios com o objetivo de possibilitar a troca individual de quadrantes de circuito danificado. Entretanto este conceito não é aplicável na prática, visto as deformações que ocorrem no equipamento durante a operação e a dificuldade na montagem de uma peça nova no conjunto usado. Outro ponto que inviabiliza esta troca individual está relacionado à precisão das medidas durante a fabricação para se garantir esta montagem, visto se tratar de um equipamento com grandes dimensões. Este procedimento se quer foi tentado pela AMSF, devido aos riscos envolvidos.

Considerando que não se justifica a troca individual dos quadrantes dos dutos, faz-se oportuno o redimensionamento dos manifolds dos dutos Móvel e Inclinado com geometria inteira e apenas uma válvula borboleta para controle de vazão na entrada e uma válvula borboleta na saída. Desta maneira, a distribuição do escoamento ocorrerá em função da perda de carga dos circuitos, preferenciando as regiões com maior agressividade térmica dos gases.

Os resultados da simulação de escoamento dos dutos Móvel e Inclinado redimensionados estão apresentados nas Figuras 12 e 13. Observa-se que a redistribuição do circuito e redução do número de acessórios resultou em um aumento considerável da velocidade do escoamento e, conseqüentemente, do coeficiente de convecção para os dois equipamentos.

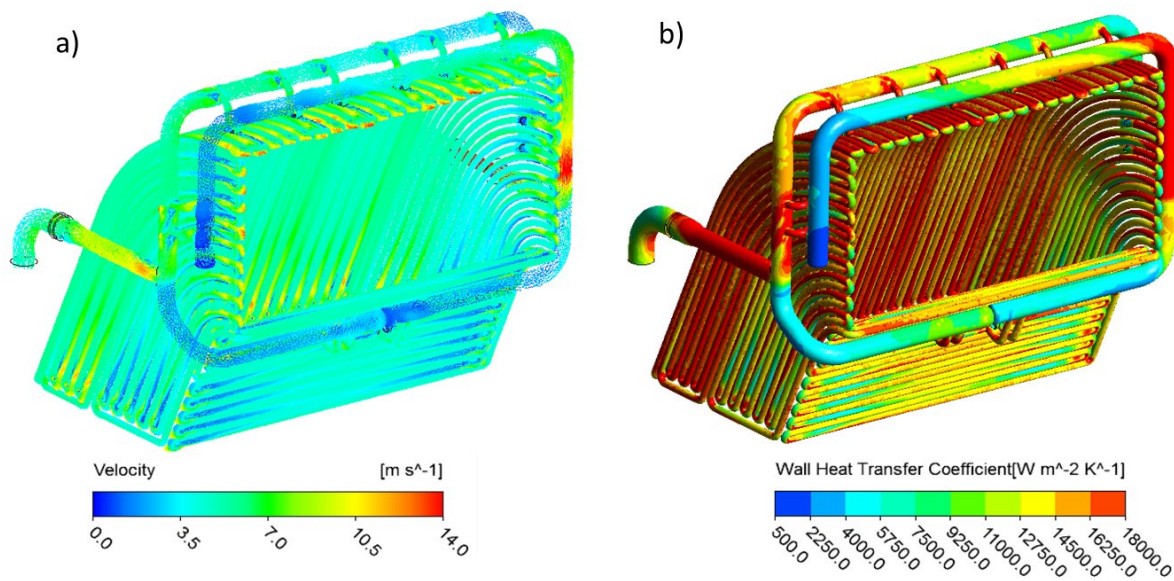


Figura 12: Resultados das simulações CFD do duto Móvel redimensionado - a) Coeficiente de Convecção; b) Vetores de velocidade.

O aumento da eficiência de refrigeração observado nas simulações do duto Móvel (Figura 12) do projeto proposto, quando comparado com as simulações do equipamento que apresentou falha (Figura 10), tende a refletir em uma menor temperatura de trabalho dos tubos. Esta melhor distribuição também se observa ao se comparar o duto Inclinado redimensionado (Figura 13) com o projeto que apresentou falha (Figura 11).

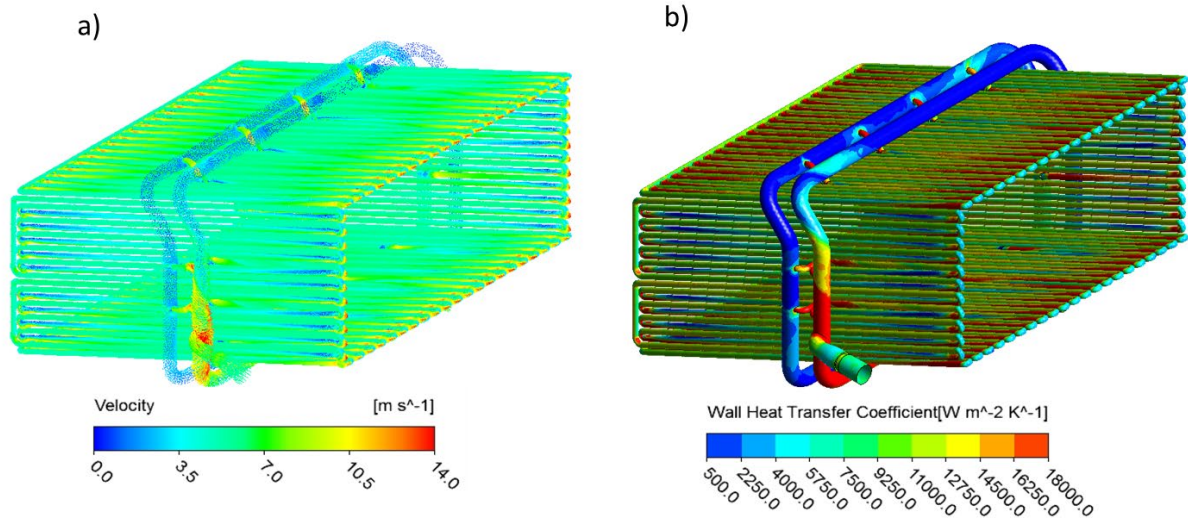


Figura 13: Resultados das simulações CFD do duto Inclinado redimensionado - a) coeficiente de convecção; b) vetores de velocidade.

Como os mecanismos de nucleação e propagação da trinca são amplificados pela maior temperatura, entende-se que a refrigeração mais eficiente dos equipamentos redimensionados pode conferir em aumento na vida útil. Isso foi comprovado na prática, conforme dados apresentados no gráfico da Figura 14.

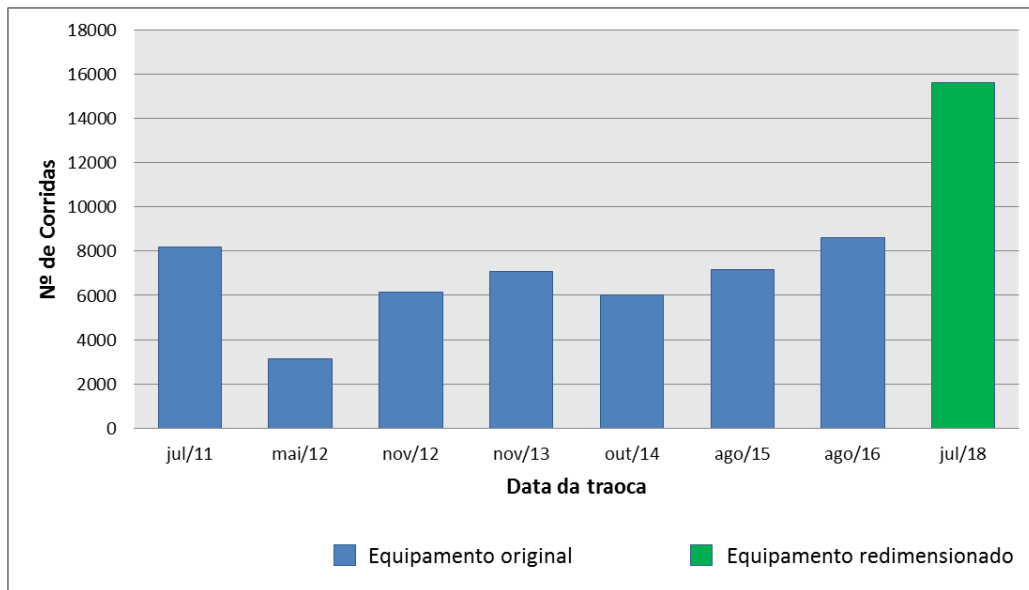


Figura 14: Histórico de vida dos dutos Móvel e Inclinado.

4 CONCLUSION

A partir da análise de falha dos equipamentos, pode-se caracterizar como mecanismo predominante de falha a trinca por fadiga térmica, iniciada por um pit de corrosão. Os pontos de falha foram correlacionados com as regiões de menor refrigeração, indicando que nas regiões de falha os tubos podem estar trabalhando com maior temperatura. Isso em função da deficiência dos manifolds na distribuição do escoamento, também pela alta perda de carga imposta pelas válvulas de controle de vazão. Partindo destas informações foram possível realizar a reengenharia dos dutos, sendo redimensionados os *manifolds* e redistribuído os circuitos de

refrigeração. Assim, os dutos tendem a trabalhar com menor temperatura, reduzindo a velocidade das reações de corrosão, bem como a amplitude de tensões térmicas, aumentando a vida em fadiga do equipamento.

Na prática, observou-se um aumento na vida do equipamento de 2,4 vezes, passando de 6500 para 15600 corridas. Com base nestas informações, conclui-se que a metodologia proposta para a reengenharia de dutos de despoeiramento de EAF confirmou ser eficiente, alcançando resultados acima das expectativas iniciais do projeto.

Acknowledgments

Os autores gostariam de expressar o seu agradecimento à Lumar Metals e ArcelorMittal Sul Fluminense por todo apoio concedido para elaboração dos estudos apresentados neste trabalho.

REFERENCES

1. GARAJAU, F. S., CETLIN, P. R., GUERRA, M. S. L., MAIA, B. T., MOREIRA, D. A., Estudo de Caso: Desgaste de Bocal de Bico de Lança da Aciaria BOF Vallourec Brasil. In: SEMINÁRIO DE ACIARIA - INTERNACIONAL, 47, 2016, Rio de Janeiro; Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2016.
2. MOURÃO, M. B. *et al.* **Introdução à Siderurgia**. São Paulo: [s.n.], 2007. ISBN ISBN 85-7737-015-1.
3. KÜHN, R.; GECK, H. G.; SCHWERDTFEGER, K. Continuous Off-gas Measurement and Energy Balance in Electric Arc Steelmaking. *ISIJ International*, v. 45, p. 1587-1596, 2005. ISSN 1347-5460.
4. GELFI, M. *et al.* Failure analysis of an electric arc furnace off-gas system. **Elsevier**, p. 42-48, Abril 2012. ISSN:1350-6307.
5. ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: Corrosion**. 9. ed, v. 13, 1992.
6. ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: Fatigue and Fracture.**, v. 19, 1996.
7. KARBOWNICZEK, M. **The Electric Arc Furnace off-gas Modelling Using CFD**. IAS Steelmaking Conference. Rosario: 2007. p. 127-134.
8. 4 ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: Failure Analysis and Prevention.**, v. 11, 2002.
9. ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: Metallography and Microstructure.**, v. 9, 2004.
10. CFX, 1. **Solver Theory Guide**. Ansys. USA. 2015.
11. SESHADRI, V. *et al.* **Fenômeno de transporte: fundamentos e aplicações nas Engenharias Metalúrgicas e de Materiais**. São Paulo: Cubo, 2010.