

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais - PPGEM

**AVALIAÇÃO VISANDO MELHORIA NO DESEMPENHO
OPERACIONAL DO DESPOEIRAMENTO DA GERDAU GUAÍRA**

RAFAEL PINTO LUCENA
Engenheiro Mecânico

Dissertação para obtenção de título de
Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia

Porto Alegre
2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais - PPGEM

**AVALIAÇÃO VISANDO MELHORIA NO DESEMPENHO
OPERACIONAL DO DESPOEIRAMENTO DA GERDAU GUAÍRA**

RAFAEL PINTO LUCENA
Mestre em Siderurgia

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Porto Alegre
2009

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela

Banca Examinadora:

Dra. Andrea Bernardes
Dr. Eng. Wagner Viana Bielefeldt
Dra. Rejane Maria Candiota Tubino

Prof. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

Porto Alegre, 23 dezembro de 2009

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que de maneira genuína sempre incentivaram a capacitação formal como forma de melhorar a sociedade em que vivemos.

A minha companheira Cristiane, que continuamente incentiva e valoriza o aprendizado, estando sempre ao meu lado.

Aos colegas da Gerdau Guaíra, que sempre estavam prontos a ajudar com sugestões, críticas, medições, enfim, valiosas contribuições que viabilizaram este trabalho.

Ao orientador Dr. Antônio Cezar Vilela, que atuou além de sua obrigação, sendo um incentivador e conselheiro.

À Gerdau, por proporcionar esta oportunidade de desenvolvimento técnico aos seus colaboradores.

Aos colegas, professores do Mestrado Profissional e à banca de qualificação, que muito contribuíram neste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	viii
ABSTRACT	10
1 Introdução	11
2 Revisão da literatura	13
2.1 Fabricação do aço	13
2.1.1 Matérias-primas	14
2.1.2 Processos de fabricação do aço	17
2.2 Sistemas de despoejamento	19
2.3 Trabalhos relacionados ao tema	20
3 Materiais e métodos	22
3.1 Aciaria Usina Gerdau Guaíra	22
3.2 Sistema de despoejamento da Gerdau Guaíra	23
3.3 Medida da troca de calor através da água de arrefecimento dos dutos e espessura	28
3.3.1 Equipamentos	28
3.3.2 Metodologias	35
3.4 Termografia dos dutos secos	43
3.4.1 Equipamentos	43
3.4.2 Metodologia	44
4 Resultados e discussão	45
4.1 Troca de calor e espessura	45
4.2 Termografia	58
4.3 Discussão geral	64
5 Conclusões	66
6 Sugestões de trabalhos futuros	67
7 REFERÊNCIAS	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de filtros de mangas em filtração (Mcfil, 2009)	19
Figura 2 – Sistema de filtros de mangas em limpeza (Mcfil, 2009)	20
Figura 3 – Fluxo de produção de aço (Anuário Guaíra, 2003)	23
Figura 4 – Fluxograma simplificado do despoejamento da Gerdau Guaíra	24
Figura 5 – Câmara de Combustão: vista lateral e vista interna (Cortesia Gerdau Guaíra)	24
Figura 6 – Vista parcial dos dutos do despoejamento após a câmara de combustão (Cortesia Gerdau Guaíra)	25
Figura 7 – Encontro do duto primário e secundário, bem como câmara de mistura (Cortesia Gerdau Guaíra)	26
Figura 8 – Câmara de mistura, ventiladores e casa de filtros de mangas (Cortesia Gerdau Guaíra)	26
Figura 9 – Vista da entrada dos compartimentos de mangas (Cortesia Gerdau Guaíra)	27
Figura 10 – Vista do trajeto dos dutos do despoejamento (Cortesia Gerdau Guaíra)	27
Figura 11 – Dutos refrigerados do lado de fora da aciaria (Cortesia Gerdau Guaíra)	28
Figura 12 – Princípio de funcionamento do medidor de líquidos por ultrassom (Manual digisonic E)	29
Figura 13 – Instalação da sonda em “V”	31
Figura 14 – Visor do medidor de vazão, eco de fundo e ruído (Medidor de vazão digisonic E)	32
Figura 15 – Medidor de espessura utilizado no trabalho.	34
Figura 16 – Painel de controle do sistema de despoejamento	36
Figura 17 – Comportamento das temperaturas da água de arrefecimento dos dutos (Cortesia Gerdau Guaíra)	37
Figura 18 – Folha de verificação de espessura dos dutos	39
Figura 19 – Folha de verificação de espessura das curvas	40
Figura 20 – Medição de espessura em duto após troca preventiva (Cortesia Gerdau Guaíra)	40
Figura 21 – Medição de espessura em duto novo (Cortesia Gerdau Guaíra)	41
Figura 22 – Duto novo (Cortesia Gerdau Guaíra)	41
Figura 23 – Medição de espessura em duto rompido após a troca corretiva próximo a ruptura (Cortesia Gerdau Guaíra)	42
Figura 24 – Medição de espessura em duto rompido após troca corretiva (Cortesia Gerdau Guaíra)	42
Figura 25 – Câmera infravermelha	43
Figura 26 – Carta de controle do duto n ⁵	47
Figura 27 – Carta de controle dos dutos n ¹⁷ , 18 e 19	48
Figura 28 – Carta de controle dos dutos n ²⁰ , 21 e 22	49
Figura 29 – Distribuição normal dos dados do duto n ⁵	50
Figura 30 – Distribuição normal dos dados dos dutos n ¹⁷ , 18 e 19	50
Figura 31 – Distribuição normal dos dados dos dutos n ²⁰ , 21 e 22	51
Figura 32 – Capacidade do processo do duto n ⁵	52
Figura 33 – Capacidade do processo dos dutos n ¹⁷ , 18 e 19	53
Figura 34 – Capacidade do processo dos dutos n ²⁰ , 21 e 22	53
Figura 35 – Transferência de calor por metro linear de duto refrigerado	55
Figura 36 – Vida média dos dutos de acordo com a posição de instalação	56
Figura 37 – Acompanhamento de espessura do duto durante 60 meses	57
Figura 38 – Acompanhamento de espessura do duto durante 60 meses	57
Figura 39 – Acompanhamento de espessura do duto durante 60 meses	58
Figura 40 – Junção do duto primário com o duto secundário: vista geral (Cortesia Gerdau Guaíra)	59
Figura 41 – Junção do duto primário (cor azul) com o duto secundário: detalhe (Cortesia Gerdau Guaíra)	59
Figura 42 – Junção do duto primário com o duto secundário: mistura dos gases (Cortesia Gerdau Guaíra)	60
Figura 43 – Entrada da câmara de mistura (Cortesia Gerdau Guaíra)	60
Figura 44 – Câmara de mistura vista frontal (Cortesia Gerdau Guaíra)	61
Figura 45 – Ventilador principal do sistema (Cortesia Gerdau Guaíra)	61
Figura 46 – Detalhe do ventilador (Cortesia Gerdau Guaíra)	62
Figura 47 – Duto plenun de acesso à casa de mangas (Cortesia Gerdau Guaíra)	62
Figura 48 – Vista parcial da casa de mangas - roscas transportadoras de pó (Cortesia Gerdau Guaíra)	63
Figura 49 – Casa de filtros mangas, vista frontal (Cortesia Gerdau Guaíra)	63
Figura 50 – Câmara de mistura: vista posterior (Cortesia Gerdau Guaíra)	64
Figura 51 – Casa de filtros de mangas: vista posterior (Cortesia Gerdau Guaíra)	64

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Principais custos do sistema de despoejamento em relação ao custo total de utilidades</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 2 – Dados para calibração de medição de vazão do duto 5</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 3 – Medida de instalação dos sensores para o duto 5.</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 4 – Sondas para cada aplicação</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 5 – Velocidade do som nos materiais e sua relação com a temperatura</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 6 – Rugosidade da tubulação</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 7 – Velocidade do som nos materiais</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 8 – Medição de vazão de água de arrefecimento dos dutos</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 9 – Temperatura máxima de arrefecimento dos dutos por corrida</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 10 – Transferência de calor por metro linear de duto refrigerado</i>	<i>54</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ΔT – Variação do tempo de propagação do som
ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
 $^{\circ}C$ – Medida de temperatura em graus Celsius
c – Calor específico
C – Velocidade do som no fluido parada
d – Componente horizontal do comprimento da trajetória do som
db – Medida de ruído
e- emissividade
FEA – Forno elétrico a arco
Kcal/metro h – Kilo Caloria por metro vezes hora
L – comprimento da trajetória do som
LCL – Lower limit control
m – Metro
 m^2 – Metro quadro
mm – Milímetro
MHz – Mega hertz
m/s – metros por segundo
 m_x – massa
Q – Quantidade de calor
 t/m^3 – Tonelada por metro cúbico
t – Tonelada
 T_{AB} – Tempo de propagação do som da A para B
T – Tempo de propagação do som
 t_x – temperatura
UCL – Upper control limit
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais
V – Velocidade de escoamento do fluido
V – Modo de instalação de sensor

RESUMO

O objetivo deste trabalho é fazer um mapeamento do sistema de dutos do despoeiramento de uma aciaria elétrica, identificando pontos de maior desgaste, validando parâmetros significativos da manutenção, bem como propor mudanças no acompanhamento de desgaste do sistema, com vistas a garantir uma melhor segurança operacional, aumentar a vida útil dos elementos do sistema filtrante e garantir controle de emissões atmosféricas. O trabalho foi desenvolvido na aciaria da Gerdau Guaíra, a partir de uma consulta bibliográfica sobre sistemas filtrantes para aciarias elétricas, parâmetros de operação, análise dos dados estatísticos das medições, além de trabalhos já realizados sobre este tema. A principal técnica utilizada para o mapeamento térmico foi a termografia. Com o trabalho proposto, pode-se: (1) adquirir conhecimento sobre o funcionamento de sistemas filtrantes para aciaria elétrica e suas principais vulnerabilidades, (2) identificar como pontos de maior desgaste os dutos da saída da câmara de combustão, (3) estabelecer relação entre o desgaste dos dutos e a posição de operação, (4) verificar que os gases provenientes do circuito primário tem uma boa homogeneidade do perfil de temperatura após o encontro do duto proveniente do sistema secundário.

ABSTRACT

The objective of this study is to map the system of dust collection of an electric arc furnace melt shop, identify points of greatest wear, validate the significant parameters of maintenance, and propose changes in the monitoring system of wear, in order to ensure better operational safety increase the life of the filter elements and ensure control of atmospheric emissions. The study was conducted at the Gerdau Guaíra steel making plant, from a bibliographic research on filtering systems for electric arc furnace, operating parameters, analyzing statistical measurements, and work already done on this subject. The main technique used for thermal mapping was the thermography. With the proposed work can be: (1) acquire knowledge about the operation of filter systems for electric melt shop and main vulnerabilities, (2) to identify that duct at the end of combustion chamber has critical for wear analisys (3) establish relationship between wear of the duct and the operating position, (4) found that the gases from the primary circuit has a good homogeneity of the temperature after meeting the duct from the secondary system.

1 Introdução

O custo total de operação do sistema de despoejamento da Gerdau Guaíra, localizada no município de Araucária, região metropolitana de Curitiba-PR, é considerado alto comparativamente ao custo de outras usinas do grupo Gerdau que utilizam o mesmo sistema de proteção do meio ambiente. São elementos determinantes dessa diferenciação o elevado consumo de energia, a alta frequência de substituição de mangas filtrantes, de painéis refrigerados da câmara de combustão e de dutos.

Os custos atuais podem ser avaliados sob dois aspectos: qualitativo e quantitativo. Sob o primeiro aspecto, exemplifica-se com mão-de-obra excessiva para manutenção do sistema, exposição demasiada de colaboradores da manutenção aos perigos inerentes ao acesso à câmara de combustão, aos dutos e à casa de filtros de mangas, frequentes interrupções, necessidade de disposição das mangas, que são trocadas por motivo de desgaste prematuro, complexidade de planejamento de estoque de mangas, dutos e partes relacionadas, ineficiência do sistema e cronograma de manutenção. Sob o aspecto quantitativo, observa-se que a vida útil média dos elementos filtrantes na Gerdau Guaíra é de um ano, enquanto que em outras usinas chega a cinco anos. Estão compreendidos no aspecto quantitativo o valor-hora do trabalho humano despendido para a manutenção do sistema, o consumo de energia elétrica, a disposição de mangas contaminadas, o custo de manutenção externa de partes recuperáveis, bem como a manutenção corretiva. Citam-se, a título ilustrativo, os dados levantados no ano de 2008 e mostrados na Tabela 1, sendo o objeto do estudo o custo de operação e o custo de manutenção externa:

Tabela 1 – Principais custos do sistema de despoejamento em relação ao custo total de utilidades

Energia elétrica consumida pelo sistema	Custo de operação (pessoal, água e outros insumos)	Substituição de filtros de manga	Manutenção externa (recuperação de dutos)	Manutenção dos painéis refrigerados da câmara de combustão	Outras despesas (depreciação, tratamento de água, etc.)
34%	3%	13%	7%	5%	38%

O objetivo deste trabalho é identificar pontos de maior desgaste do sistema de despoejamento da Gerdau Guaíra, proporcionando mudança de práticas operacionais ou de manutenção, bem como um aumento de disponibilidade e redução de custo global do sistema (operação e manutenção externa).

2 Revisão da literatura

A revisão da literatura tem como objetivo fornecer os elementos básicos, necessários à compreensão do processo de fabricação do aço, notadamente no forno elétrico, sem, todavia, esgotar a questão. Maiores informações sobre esse processo podem ser encontradas na bibliografia utilizada.

2.1 Fabricação do aço

Segundo HERSKOVIC (1976), o processo de fabricação do aço por volta do ano de 1900 era dominado pelos processos Bessemer e Martin.

Por volta de 1906, o aço Bessemer atingia em muitos países sua mais alta produção, iniciando-se, a partir daquele ano, o seu declínio em favor do procedimento Siemens-Martin, o qual se desenvolvia rapidamente. O declínio do processo Bessemer prosseguiu-se, e hoje sua produção representa apenas uma pequena parcela do total mundial, enquanto o procedimento Siemens-Martin constituía-se durante muitos anos no meio mais utilizado para a produção de toneladas importantes de aço carbono.

Naquela mesma época, as primeiras corridas de aço no forno elétrico foram realizadas, por exemplo, em Remscheid, na Alemanha (1905) e em Syracuse, nos Estados Unidos (1906).

No início, o forno elétrico era sobretudo considerado como um aparelho para fabricação de aços especiais, de aço inoxidável e de aços fortemente ligados, devido ao fato de que a maior parte dessas qualidades não podiam ser fabricadas por outra forma, e as possibilidades de controlar com precisão a análise química e a temperatura eram características do forno elétrico.

Os progressos realizados no curso desses últimos anos tem mostrado que é possível, com fornos a arco de ultra alta potência, por em marcha potências elevadas e conseguir altas produtividades, o que tem permitido considerar o emprego desse procedimento na elaboração de aços comuns. Ao contrário de muitos outros procedimentos, esse é de grande flexibilidade, e pode ser utilizado para fundir os mais variados materiais.

O forno a arco moderno aparece como um notável aparelho de fusão e, completado, se necessário, pelos tratamentos suplementares fora do forno, pode ser empregado para a elaboração das mais variadas qualidades.

Para maximizar a eficiência na fabricação do aço em forno elétrico, é fundamental o conhecimento da qualidade, custo e disponibilidades dos numerosos tipos de matérias-primas, GIL (1977). Frequentemente é dada pouca atenção a esse problema, sendo a seleção das matérias-primas o primeiro passo para obtenção de aço de alta qualidade.

Serão apresentadas a seguir as principais matérias-primas utilizadas na produção do aço.

2.1.1 Matérias-primas

A fabricação do aço no forno elétrico a arco (FEA) consiste principalmente na fusão de cargas metálicas visando à obtenção de um produto com composição química e condições físicas desejáveis, conforme CHEVRAND (2007).

Segundo SUSAKI (2008), em torno de 20% da produção brasileira de aço é realizada em FEA, cuja matéria-prima principal é a sucata de aço. Além desta, a carga é composta, nos casos mais freqüentes, por cerca de 30% de gusa líquido ou sólido. O gusa não só atua como um diluidor das impurezas presentes na sucata, mas, principalmente como fonte de calor, devido à oxidação de Si e C. Tal como no processo LD, adicionam-se fundentes para escorificar os óxidos formados bem como impurezas exógenas que acompanham a carga metálica. O consumo de escorificantes no FEA é fortemente dependente do tipo de aço produzido. Assim, na produção de aços comuns, a quantidade típica de cales consumida no FEA é de 25 a 30kg de cal calcítica e 7 a 12 kg de cal dolomítica por tonelada de aço líquido.

a) Materiais metálicos

Segundo HERSKOVIC (1976), de todas as matérias-primas utilizadas em forno elétrico, a mais importante são as sucatas. O tipo, tamanho e composição química da sucata tem grande influência não só no processamento de uma corrida, como também na qualidade final do lingote ou placa. A sucata pode ser de retorno da própria usina, bem como sucata adquirida de terceiros. A da própria usina é, via de

regra, facilmente classificada, enquanto a outra deverá sofrer um rígido controle. Para compor corretamente uma carga deve-se lembrar certas leis químicas de fabricação de aço, que envolvem a ocorrência de certos elementos num banho metálico:

- elementos insolúveis no banho e na escória, os quais vaporizam durante a fusão: Pb, Zn, Cd;
- elementos não oxidáveis e que permanecem no banho: Cu, Ni, Sn, Mo, Co, As, Cb;
- elementos parcialmente oxidáveis e que vão para a escória: Mn, P, Cr;
- elementos quase completamente oxidáveis e que vão para a escória: Al, Si, Ti, Zr, B, V.

Os tipos mais comuns de sucatas utilizadas na fabricação de aço, CLASSIFICAÇÃO DE METÁLICOS GERDAU (2007), assume a seguinte classificação quanto ao formato:

- Sucata solta: é aquela sucata que não sofreu nenhuma transformação (prensagem, corte, trituração). Essa sucata precisa ou não ser industrializada, dependendo da sua densidade, quantidade de impurezas e nível de residuais.
- Sucata cortada: é aquela sucata que foi cortada para se adequar às condições de transporte e uso no forno de fusão.
- Sucata prensada: é a sucata que foi industrializada em prensas, gerando pacotes que tem arestas de 60cm e com densidade mínima de $0,5t/m^3$.
- Sucata prensada e cortada: essa sucata tem comprimento máximo de 60cm e apresenta uma densidade de $0,7t/m^3$.
- Sucata triturada ou fragmentada: essa é mais difícil de ser encontrada. Tem densidade variando de $0,75$ a $1,3t/m^3$ e seu volume individual da ordem de $120cm^3$, sendo toda amassada e com bastante pontas.
- Briquetes: tem a forma cilíndrica, com altura e diâmetro em torno de 20cm (parecem com latas de azeite). A matéria-prima destes Metálicos são os cavacos.
- Encharutada: são pacotes longos com menor compactação.

Quanto à composição química, a sucata ferrosa ou de aço carbono pode ser classificada da seguinte forma:

- Estamparia preta solta: gerada na estampagem de chapas finas de aço, com baixos teores de residuais.
- Estamparia revestida solta: gerada na estampagem de aços carbono, com revestimento metálico ou não, como folhas de flandres, telhas galvanizadas e chapas

litografadas e cobreadas. Essa é a sucata das indústrias que utiliza chapas finas revestidas.

- Oxicorte: essa sucata é gerada em indústria, como calderarias pesadas, fábricas de tubos, estruturas metálicas pesadas, indústria naval e ferroviária.

- Forjada: essa sucata é do mesmo tipo da sucata oxicorte, admitindo, no entanto, residuais metálicos (Cr, Ni, Mo). É aquela sucata proveniente de peças forjadas e que se enquadra até como sucata ligada.

- Sucata mista: sucata gerada por ser usada (obsolescência), composta por aços diversos, de baixa densidade, a exemplo de chaparias automobilísticas, veículos, bicicletas, telas, geladeiras, fogões, armações, calhas, tambores, grades e arames.

- Miúda: essa sucata é gerada por desuso, contendo peças das mais variadas composições químicas e coberturas superficiais. Ela tem boa densidade, $0,70t/m^3$, estando pronta para uso. Suas dimensões são inferiores a $0,80m$.

- Latinha: gerada por obsolescência (normalmente encontrada em linhas de reciclagem de lixo ou coleta seletiva), composta por latas utilizadas para embalagens, tais como óleo comestível, óleo lubrificante, conservas e alimentos diversos. Quando prensadas, geram o pacote de latinha.

- Ferro fundido: tem quase a mesma composição química que o ferro gusa no que tange a carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre.

- Cavacos: cavacos são gerados na usinagem de peças metálicas de aço.

- Ferro gusa: constitui-se em uma das melhores matérias-primas para uso em forno elétrico na composição da carga, apresentando como vantagens o teor de carbono entre 3,5 e 4,5%, que proporciona economia, ou evita a utilização de carvão coque na carga, o material é livre de elementos residuais com uma composição química estável - teores de Si (<1%), P (<0,15%) e S (<0,05%), além de densidade elevada ($3t/m^3$).

b) Matérias-primas oxidantes

- Oxigênio: é utilizado como descarburante e como acelerador de fusão, o que contribui para a diminuição do custo operacional e para o aumento de produtividade, sendo utilizando sob forma praticamente pura (95 a 98%).

- Minério de ferro: utilizado como material de carga para desfosforar a baixa temperatura.

- Carepa: pode ser utilizado juntamente com o minério de ferro ou em substituição a este, é uma boa fonte de ferro e óxido de ferro.

c) Ferro ligas

A composição do aço exerce a maior influência sobre as propriedades físicas do produto e, por consequência, um dos primeiros objetivos da fabricação do aço em forno elétrico é a obtenção de uma composição química dentro da especificação; os elementos químicos desejados na especificação de um aço podem ser adicionados nas seguintes fases da fabricação: no carregamento, no banho líquido e na panela, durante o vazamento.

2.1.2 Processos de fabricação do aço

Quanto ao processo de fabricação do aço propriamente dito, compreende as seguintes fases:

a) Carregamento

Segundo SILVEIRA (1983), o carregamento do forno é efetuado, quase que sem exceção, por meio de cestas ou caçambas de carregamento, geralmente duas ou três por corrida. A operação de carregamento compreende as fase seguintes: saída dos eletrodos, pivotamento da abóboda, chegada da cesta, abertura e, em seguida, retirada da cesta, retorno da abóboda e descida dos eletrodos. Ela dura de 4 a 5 minutos, precisando-se do conteúdo de três cestas para encher o forno. O tempo total será de 12 a 15 minutos por corrida.

b) Fusão

Na fusão ocorre o arco elétrico entre os eletrodos e a carga metálica. A transferência de calor ocorre por radiação, condução e convecção. Além da energia elétrica, existe também a energia transferida para a carga metálica de origem

química. Essa fonte provem das reações químicas exotérmicas que ocorrem no interior do forno através da oxidação dos elementos: Si, Mn, C, CH₄ e Fe, além da queima dos gases CO e H₂, oriundos nas reações dos elementos anteriores. Em todas estas reações é necessária presença do O₂. Na transferência de calor por convecção é destacada a função da escória espumante que, além desta função, ainda auxilia na manutenção do arco elétrico, preservação do refratário e painéis de refrigeração, redução de perdas de ferro no aço bem como recebendo os óxidos do banho metálico.

c) Retirada de escória

Quando a operação de refino não é necessária, as escórias são geralmente retiradas imediatamente antes do vazamento ou adição dos elementos de liga. A retirada das escórias é necessária quando se quer evitar uma refosforação, melhorar o rendimento dos elementos de liga, obter-se variações menores na composição desejada do aço, redução da chegada das escórias nas placas da passagem durante o vazamento, etc. Pode-se admitir que essa operação demanda de 3 a 5 minutos. Quando o refino é necessário, deve-se proceder bem antes à retirada cuidadosa da escória, e deve-se prever para a operação um pouco mais de tempo.

d) Retirada de amostra / espera de resultado de análise

A duração dessas operações depende muito do equipamento do laboratório onde são realizadas e da aptidão do pessoal. Considera-se que são retiradas no mínimo uma amostra no fim da fusão e outra imediatamente antes do vazamento.

e) Vazamento

O tempo necessário para transferir o conteúdo do forno para a panela não deve ultrapassar 4 a 5 minutos, uma vez que a abertura de vazamento é adaptada ao tamanho do forno.

Descritas as principais etapas de fabricação do aço em forno elétrico, estão colocados os elementos necessários para a compreensão do sistema de despoeiramento em aciaria elétrica, tratado no item a seguir.

2.2 Sistemas de despoeiramento

Segundo ACOSTA (2003), durante a operação do forno elétrico ocorre a geração de emissões atmosféricas, com a predominância de fumos, material particulado e gases. Essas emissões são encaminhadas ao sistema de tratamento para segregação das partículas sólidas. O material particulado, captado na casa de filtros do sistema de tratamento, origina o subproduto chamado pó de aciaria.

Conquanto existam outros sistemas de despoeiramento apontados na literatura (ACOSTA, 2003), faz-se oportuno o enfoque sobre o sistema utilizado na Gerdau Guaíra, que é o sistema de filtros de manga, o mais usual para aciarias elétricas, de acordo com MACINTYRE (1990).

Na Figura 1, demonstra-se de forma esquemática o processo de filtração que ocorre na casa de mangas. No início o conjunto de filtros de mangas está limpo, o gás com pó, proveniente do FEA, é forçado através das mangas, que fazem a retenção do pó, liberando gás para a atmosfera sem contaminação.

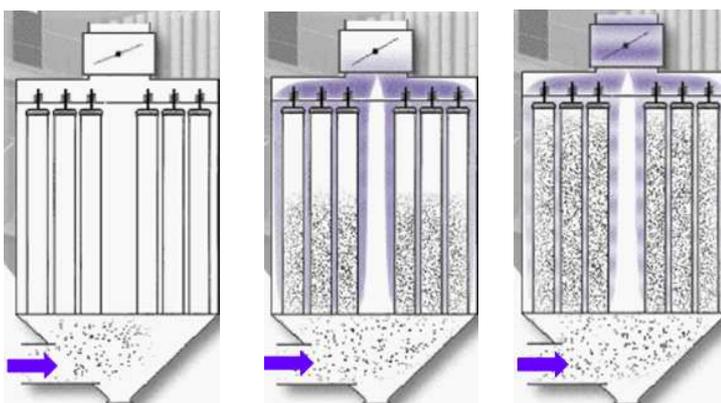


Figura 1 – Sistema de filtros de mangas em filtração (Mcfil, 2009)

Na Figura 2, demonstra-se o processo de limpeza do conjunto de mangas após sua saturação. A admissão de gás proveniente do FEA é interrompida, iniciando a sucção de ar atmosférico, que passa através das mangas, forçando o pó acumulado a cair em um funil, de onde é coletado para posterior destinação.

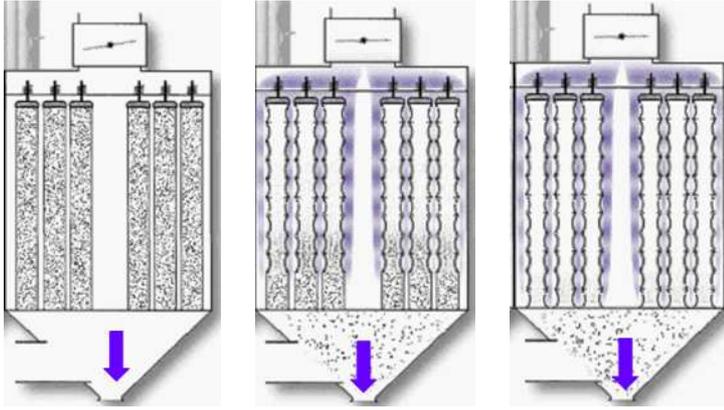


Figura 2 – Sistema de filtros de mangas em limpeza (Mcfil, 2009)

A coleta do pó, segundo LINDLEY (1977), é instalada com um ou mais propósitos, como segue abaixo:

- evitar a contaminação do ambiente de trabalho por partículas;
- adequar-se à legislação legal;
- evitar incômodo local ou dano à propriedade;
- reaproveitamento de material;
- reduzir ou evitar incêndio ou explosões de produtos perigosos;
- possibilitar a recirculação de ar limpo para espaço de trabalho quando permitido pelas autoridades reguladoras.

Para a operação da aciaria em conformidade com a legislação vigente, é necessário o atendimento dos Limites de Emissão para Poluentes Atmosféricos gerados nas Indústrias Siderúrgicas Integradas e Semi-Integradas e Usinas de Pelotização de Minério de Ferro, segundo Conselho Nacional do Meio Ambiente (Resolução Nº 382).

Segundo manual técnico Mcfil (2009), o material das mangas comumente utilizado possui na sua composição os seguintes materiais: poliéster, politetrafluoretileno, lã de vidro, possuindo limitações de temperatura de aplicação bem como teor máximo de umidade.

2.3 Trabalhos relacionados ao tema

Não foram localizados na literatura trabalhos específicos ou relacionados ao objetivo do trabalho proposto. Existem trabalhos sobre desgastes de materiais metálicos e sobre termografia aplicada a identificação de problemas elétricos e mecânicos em componentes, além do já apresentado ou referenciado na literatura de

apoio, os modelamentos hidráulicos, dimensionamento de sistemas de filtração e coleta de pó, conforme ACOSTA (2003).

3 Materiais e métodos

Inicialmente será apresentada a aciaria, onde está localizado o sistema de despoejamento em estudo. Após, o referido sistema será descrito, destacando-se, na sequência, as técnicas e os respectivos equipamentos utilizados.

3.1 Aciaria Usina Gerdau Guaíra

A Usina de Araucária fica situada no município de Araucária, Região Metropolitana de Curitiba, em terreno de 170 hectares, contando com 36.440 m² de área construída. Iniciou suas operações em 1982. No mesmo local, estão localizados os prédios administrativos, a área de lazer dos funcionários e a Fundação Gerdau.

A planta industrial conta com as seguintes instalações:

- Pátio de Sucata com 2 prensas para industrialização.
- Forno a arco elétrico de 80t., para fusão da matéria-prima.
- Forno panela de 80t para adequação da composição química e de temperatura.
- Lingotamento contínuo de tarugos com 4 veios, para bitolas quadradas de 100, 120 e 150 mm.
- Espectrômetros para análise de composição química.
- Oficina de manutenção e almoxarifado central.
- Subestação elétrica.
- Estação de tratamento de água.
- Sistema de despoejamento e pátio de resíduos.

A Usina Vila Guaíra fica situada no bairro Água Verde, na cidade de Curitiba, em terreno de área total de 12.000 m², dos quais 7.000 m² de área construída. Iniciou sua operação em 1946, passando por atualizações tecnológicas desde sua incorporação pelo Grupo Gerdau. Neste local, estão localizados o escritório de vendas regionais e a Fundação Gerdau, além de:

- Forno de reaquecimento.
- Laminador aberto de barras com leito de resfriamento.
- Linha de tratamento térmico de vergalhões com 3 veios (thermex).

- Prédios para estocagem de produtos.
- Oficina de manutenção e almoxarifado central.
- Subestação elétrica.

As matérias-primas (ferro-gusa, ferroligas, sucatas e cal) são fundidas, produzindo o aço líquido, de acordo com as especificações de composição química, passando ao lingotamento contínuo, gerando o tarugo. O tarugo é vendido para o mercado ou é transferido para empresas do Grupo Gerdau, ou para a Laminação em Curitiba. Na Laminação, o tarugo é reaquecido, laminado, recebe tratamento térmico, sendo vendido sob a forma de vergalhão aos clientes. O fluxo básico do produto está detalhado na Figura 3.

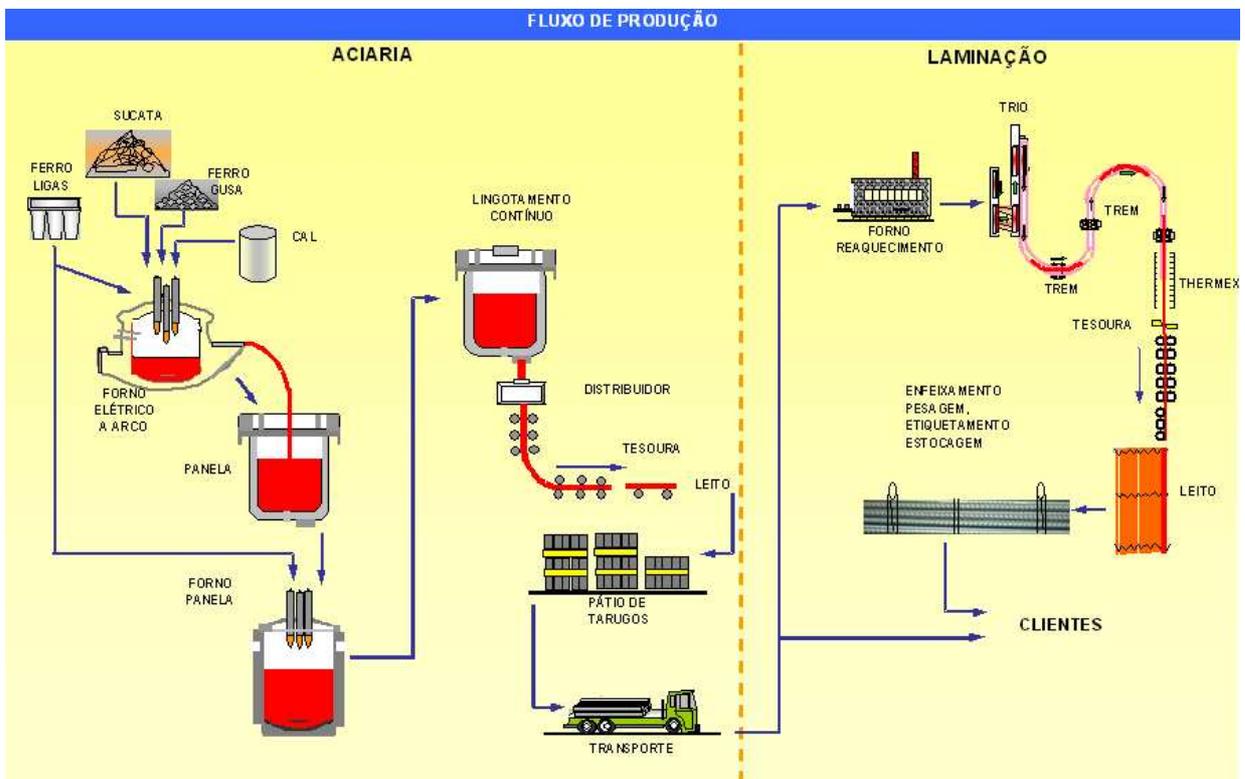


Figura 3 – Fluxo de produção de aço (Anuário Guaíra, 2003)

3.2 Sistema de despoeiramento da Gerdau Guaíra

Na Figura 4 pode-se verificar o fluxograma simplificado do despoeiramento.

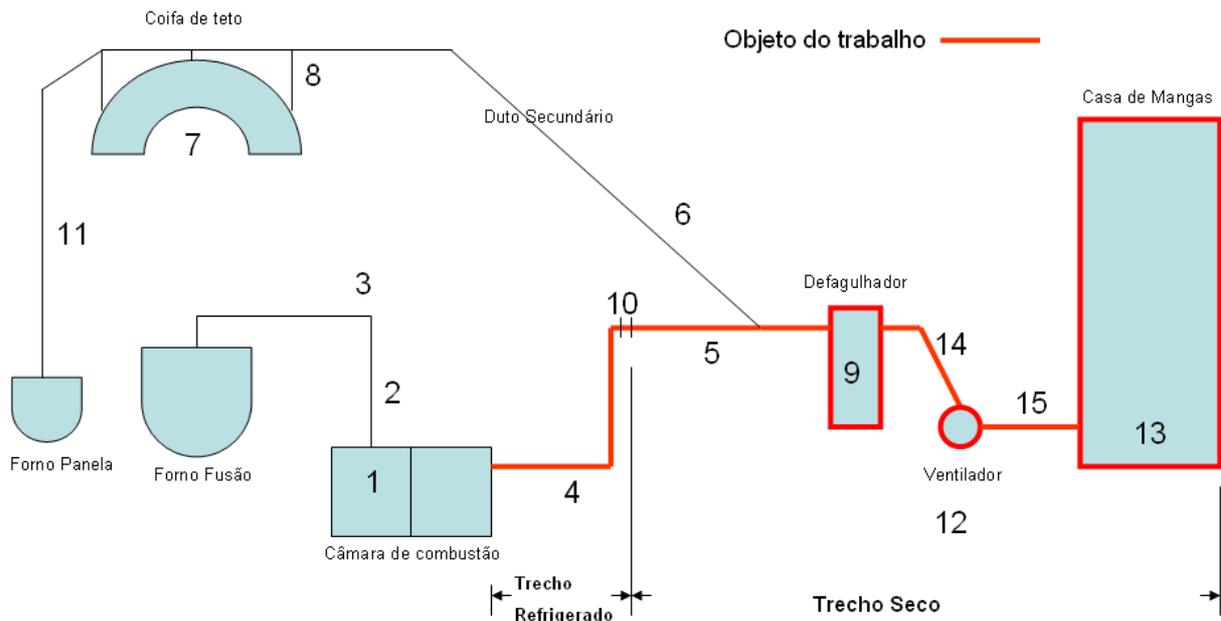


Figura 4 – Fluxograma simplificado do despoejamento da Gerdau Guaíra

Na Gerdau Guaíra, o sistema de despoejamento é de concepção convencional, na sua versão mais atualizada, pois é dotado de câmara de combustão (1) retangular resfriada a água (tipo *channel*), que funciona também como um sistema de pré-coleta de materiais de maior granulometria, Figura 5.



Figura 5 – Câmara de Combustão: vista lateral e vista interna (Cortesia Gerdau Guaíra)

Os dutos resfriados, situados entre o forno e a câmara de combustão, são do tipo tubo a tubo (2), sendo que o *elbow* (cotovelo) (3) do lado do despoejamento é do tipo basculante, detalhe de construção este que visa facilitar os procedimentos de remoção da escória que eventualmente se acumulam nessa parte do sistema.

Os dutos resfriados instalados após a câmara de combustão são do tipo jaquetado (dupla camisa) (4), conforme Figura 6. Após o término destes, o duto primário passa a ser do tipo seco (5), até a conexão com o duto secundário (6).



Figura 6 – Vista parcial dos dutos do despoeiramento após a câmara de combustão (Cortesia Gerdau Guaíra)

O *canopy hoop* (coifa de teto) (7) é dotado de três dutos de exaustão (*off-takes*) (8), sendo que estes se juntam em um único duto, o qual percorre o teto da aciaria, até se dirigir à câmara de mistura (9), passando antes por um *damper* de abertura proporcional (*modulating damper*) (10).

A exaustão do forno panela (11) é formada por uma coifa montada sobre a abóboda, *damper* de controle, ventilador *booster* e dutos do tipo seco. O duto de descarga do ventilador *booster* é interligado ao duto da coifa, ainda sobre o teto da aciaria.

Após as junções dos ramais da coifa, do forno panela e do primário, o duto combinado, do tipo seco, se dirige ao ponto de conexão com a câmara e mistura.

A câmara de mistura, construção cilíndrica vertical destinada à homogeneização dos gases primários e secundários, serve também como defagulhador (eliminador de fagulhas) e como pré-coletor de eventuais partículas pesadas, conforme Figura 7, antes que estas cheguem até os ventiladores (12) e filtro de mangas (13), Figura 8.



Figura 7 – Encontro do duto primário e secundário, bem como câmara de mistura (Cortesia Gerdau Guaíra)



Figura 8 – Câmara de mistura, ventiladores e casa de filtros de mangas (Cortesia Gerdau Guaíra)

O duto combinado (14) sai da câmara de mistura e se dirige aos ventiladores principais, sendo que, após estes, três dutos retangulares se conectam ao *plenum* (15) de entrada do filtro de mangas.

O filtro de mangas é do tipo de ar reverso em pressão positiva, dotado de 10 compartimentos com 192 mangas em cada. As mangas são de tecido em polyester, diâmetro 292mm x 10.000mm, conforme podem ser vistas na Figura 9.



Figura 9 – Vista da entrada dos compartimentos de mangas (Cortesia Gerdau Guaíra)

Na figura 10 pode-se localizar detalhe do duto refrigerado do circuito primário, bem como a conexão do duto secundário com o *canopy hoop*.



Figura 10 – Vista do trajeto dos dutos do despoejamento (Cortesia Gerdau Guaíra)

No lado externo da aciaria, pode-se notar os detalhes da fixação e trajeto de trechos dos dutos primários e secundários (Figura 11).



Figura 11 – Dutos refrigerados do lado de fora da aciaria (Cortesia Gerdau Guaíra)

3.3 Medida da troca de calor através da água de arrefecimento dos dutos e espessura

O sistema de despoeiramento, para fins da análise proposta, foi dividido em duas partes: uma contendo os dutos refrigerados com água e outra contendo os dutos secos. Esta divisão se faz necessária visto que os fenômenos de transferência de calor e de detecção da troca térmica são distintos. A seguir será apresentado o trabalho nos dutos refrigerados.

3.3.1 Equipamentos

Para a realização da medição de vazão individualizada por duto, foi utilizado o equipamento Medidor de vazão ultrafux digisonic E, que segue o seguinte princípio de funcionamento: duas sondas A e B são montadas em um escoamento fluido, como mostra a Figura 12.

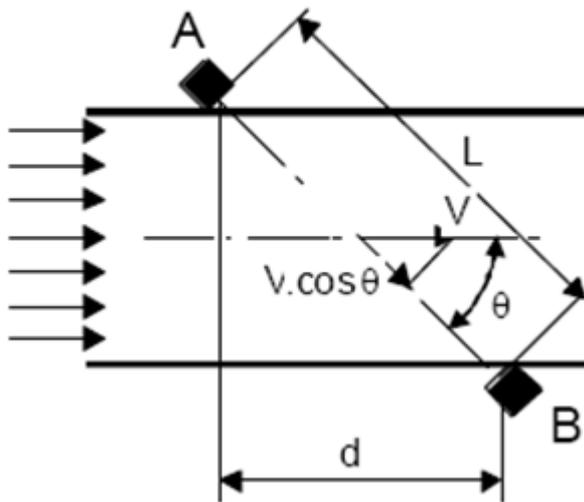


Figura 12 – Princípio de funcionamento do medidor de líquidos por ultrassom (Manual digisonic E)

$$T_{AB} = \frac{L}{C + v \cos \theta} \quad (1)$$

$$T_{BA} = \frac{L}{C - v \cos \theta} \quad (2)$$

Sendo:

v Velocidade de escoamento do fluido

L Comprimento da trajetória do som

d Componente horizontal do comprimento da trajetória do som

C Velocidade do som no fluido parado

T Tempo de propagação do som

As sondas ficam emitindo e recebendo alternadamente o som. O tempo de propagação de A para B e de B para A pode ser determinado conforme as equações (1) e (2) descritas anteriormente.

A velocidade do fluido (**v**) pode ser calculada medindo-se precisamente os tempos de propagação **T_{AB}** e **T_{BA}**, enquanto os parâmetros **L** e **d** são igualmente conhecidos. É importante notar que a equação (5) é independente da variação da velocidade do som no líquido.

$$\frac{1}{T_{BA}} - \frac{1}{T_{AB}} = \frac{2v \cos \theta}{L} = \frac{2vd}{L^2} \quad (3)$$

Então:

$$v = \frac{L^2}{2d} \left(\frac{1}{T_{AB}} - \frac{1}{T_{BA}} \right) \quad (4)$$

Se $\Delta T = T_{BA} - T_{AB}$, então:

$$v = \frac{L^2}{2d} \left(\frac{\Delta T}{T_{AB} - T_{BA}} \right) \quad (5)$$

A unidade como um todo é pilotada por uma unidade de processamento, que coleta as medições brutas (T , ΔT), provenientes do bloco "Emissão/Recepção/Processamento de sinais", e calcula a vazão usando os parâmetros de calibração.

Como o ultrassom é capaz de se propagar através da parede dos tubos, o aparelho de medição pode ser operado tanto com sondas externas como com sondas internas.

Para a medição correta da vazão, é necessária a calibração do instrumento, observadas as características do tubo. A título exemplificativo, relacionam-se os dados do duto 5 na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados para calibração de medição de vazão do duto 5

Dados técnicos informados	
Circunferência Externa (mm)	535
Espessura (mm)	6,75
Material da Tubulação	Aço
Tipo de Instalação das Sondas	V
Referência da Sonda (Modelo Sonda)	1591
Fluido	Água
Rugosidade (mm)	0,15

Desta forma, obtém-se a medida de instalação dos sensores, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Medida de instalação dos sensores para o duto 5.

Resultado após informação dos dados	
Distância entre Sondas (mm)	158

Para medição da vazão de água neste trabalho, foi utilizada a sonda em instalação do tipo “V”. Nesse caso, elas são instaladas na mesma geratriz. Esse é primeiro modo a ser testado. Ele ignora qualquer componente radial do escoamento, e a instalação é muito fácil, conforme Figura 13.

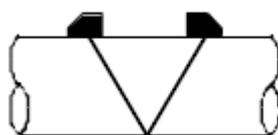


Figura 13– Instalação da sonda em “V”

A instalação das sondas deve seguir a orientação descrita na Tabela 4, de acordo com o diâmetro da tubulação.

Tabela 4 – Sondas para cada aplicação (Manual digisonic E)

CARACTERÍSTICAS DAS SONDAS EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO				
REFERÊNCIA DA SONDA	UTILIZAÇÃO			
	DIÂMETRO DO DUTO	TIPO DA SONDA	NÚMERO DE CORDAS	MODO
1584	20 A 60 mm	Externa	Mono ou multicorda	V ou W
1588	60 a 300 mm	Externa	Mono ou multicorda	V ou W
1591	500 a 3000 mm Dutos sujos, água com partículas	Externa	Mono ou multicorda	V
1614	100 a 100 mm	Interna	Mono ou multicorda	V
1612-1	500 a 1500 mm água suja	Interna	Mono ou multicorda	V
1612-1	3000 mm água limpa	Interna	Mono ou multicorda	V
1612-2	500 a 2000 mm água limpa	Interna	Mono ou multicorda	V

Eco e ruído no mostrador do equipamento sinalizam que os sensores foram instalados corretamente e que a medição está correta, conforme Figura 14.

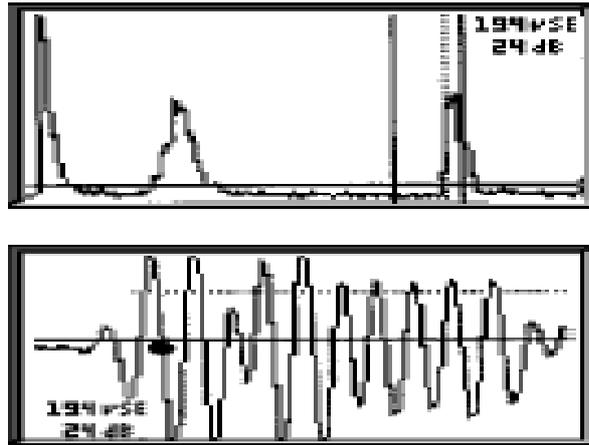


Figura 14 – Visor do medidor de vazão, eco de fundo e ruído (Medidor de vazão digisonic E).

A temperatura da água também sinaliza que a velocidade do som está correta (Tabela 5).

Tabela 5 – Velocidade do som nos materiais e sua relação com a temperatura (Manual digisonic E)

t (°C)	C (m/s)	t (°C)	C (m/s)
0	1 403	30	1 506.4
5	1 426.5	35	1 520.1
10	1 447.6	40	1 529.2
15	1 466.3	45	1 536.7
20	1 482.7	50	1 542.9
25	1 497		

Valor aproximado $C=1557-0,0245.(74-t)^2$

A rugosidade é o último parâmetro que deve ser selecionado, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Rugosidade da tubulação

TABELA DE RUGOSIDADE		
TIPOS DE SONDAS E MATERIAIS	ESTADO EXTERNO DAS SONDAS E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	RUGOSIDADE mm
TUBOS DE METAL (Continuação)		
Tubos de aço soldados	Novo ou mesmo em bom estado, soldado ou reabilitado	0,04 - 0,10
	Novo revestido com asfalto	0,05
	Há muito tempo em serviço, asfalto parcialmente gasto, corroído	0,1
	Há muito tempo em serviço, corrosão uniforme	0,15
	Sem irregularidades notáveis nas juntas, com revestimento interno (espessura: 10mm ou mais) Estado superficial ruim	0,3 - 0,4
	Rebitagem plana ou dupla, com ou sem revestimento interno (espessura 10mm) sem corrosão	0,6 - 0,7
	Revestimento interno mas com alguma oxidação, sujos durante serviço com água, mas não corroídos	0,95 - 1,0
	Com dupla rebitagem não corroído, sujos durante serviço com água	1,2 - 1,5
	Depósitos reduzidos	1,5
	Com dupla rebitagem, altamente corroídos	2
	Depósitos pesados	2,0 - 4,0
	Superfície externa do cano em péssimo estado, juntas irregulares	≥ 5,0

Quanto à medição de espessura, foi utilizado o equipamento medidor de espessura ultrassônico digital, marca Time, modelo TT-300, escala 1mm a 225mm, resolução 0,1 e 0,01 mm, precisão 1% + 0,1, sensor 5MHz (espessura de 1,2 mm até 225 mm – para o material aço), conforme Figura 15.



Figura 15 – Medidor de espessura utilizado no trabalho.

O princípio de medição de espessura com ondas ultrassônicas baseia-se no fenômeno de reflexão de ondas acústicas, quando encontram obstáculos à sua propagação dentro do material. A onda será refletida, retornando até à sua fonte geradora se o obstáculo estiver numa posição normal (perpendicular) em relação ao feixe incidente.

A espessura do material pode ser determinada pela medição precisa do tempo que a onda leva para ser transmitida, e para isso é preciso que se saiba qual o material em que será feita a verificação de espessura, conforme Tabela 7, para que, na sequência, seja feito o *setup* no medidor de espessura.

Tabela 7 – Velocidade do som nos materiais (Manual digisonic E)

material	velocidade (m/s)
ar	330
Alumínio	6300
Cobre	4700
Ouro	3200
Aço	5900
Água	1480
Prata	3600
Níquel	5600
Acrílico	2700

Deve-se observar as limitações do processo para a obtenção de respostas ultrassônicas satisfatórias. A face do objeto ou deve ser paralela ou coaxial relativamente à face a ser medida.

Tanto a espessura quanto a velocidade da onda ultrassônica são influenciadas pela temperatura. Logo, a medição deve ocorrer à temperatura ambiente.

O procedimento de medição segue os seguintes passos:

- Limpeza da superfície antes da medição: deve ser eliminada toda e qualquer poeira, sujeira e ferrugem que porventura estejam sobre a região a ser inspecionada.

- Melhoramento da superfície onde o sensor será utilizado: superfícies ásperas causam erro na medição. Assim, ao se iniciar o procedimento, deve-se uniformizar a superfície (esmerilhando, polindo e limpando), para somente então se utilizar o agente acoplante.

- Verificação da espessura: antes de se efetuar a medição, deve-se ter o cuidado de verificar a calibração do sensor. Para tanto, utiliza-se um cabeçote acoplado ao aparelho.

3.3.2 Metodologias

Durante a operação do FEA, os operadores tem à disposição um sistema de controle (Figura 16), o qual pode determinar a posição dos dutos em relação ao processo, bem como as temperaturas de entrada e saída da água de arrefecimento. Não existe controle de vazão da água de arrefecimento, sendo esta fixa.

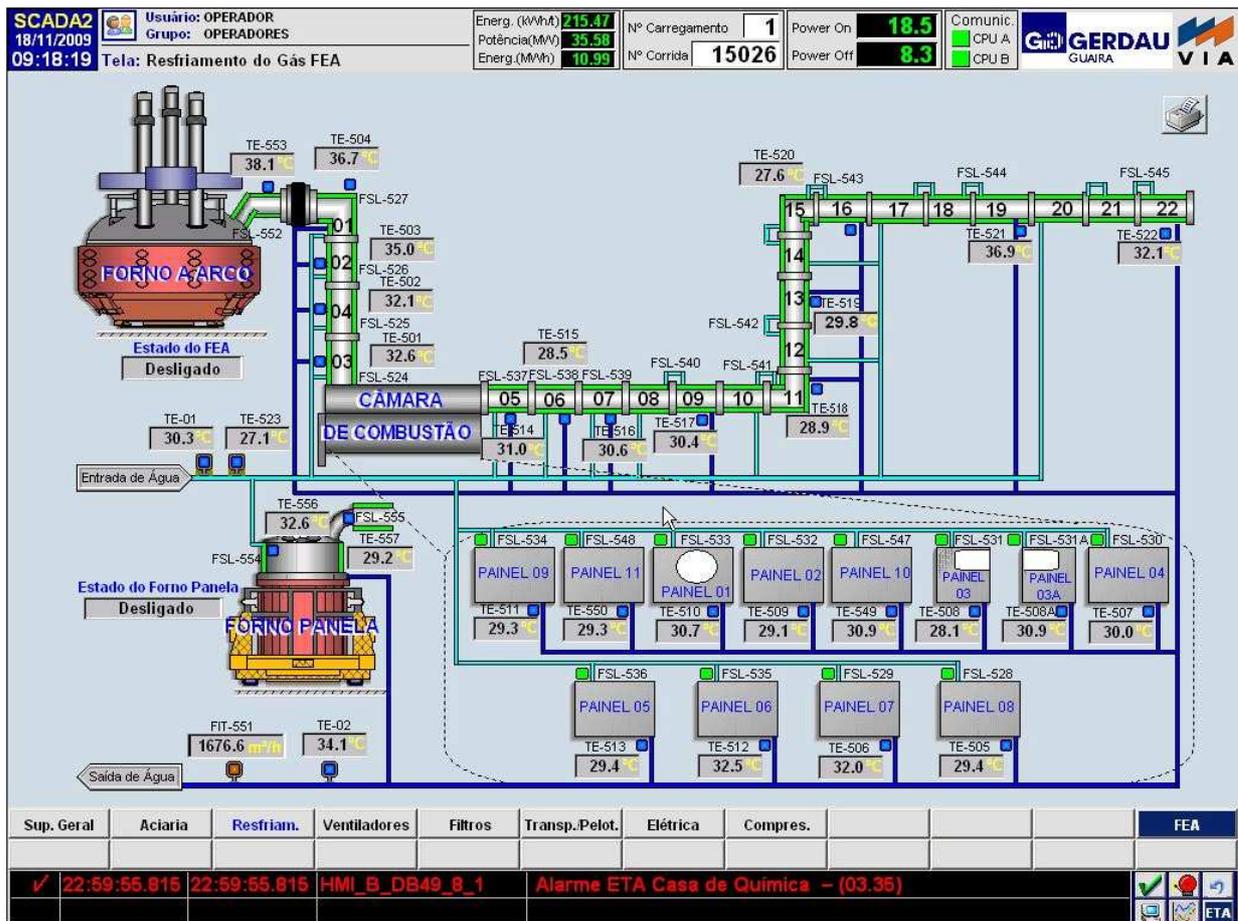


Figura 16 – Painel de controle do sistema de despoeiramento

O comportamento das temperaturas da água de arrefecimento dos dutos (Figura 17) pode ser verificado durante as corridas na tela de histórico. A partir da referida tela é que serão obtidos os dados alusivos às temperaturas de água - saída e entrada para verificação da quantidade de calor extraída dos dutos. Observa-se que a temperatura oscila de acordo com a etapa de fabricação do aço: fusão, carregamentos, refino, injeção de O₂, etc.



Figura 17 – Comportamento das temperaturas da água de arrefecimento dos dutos (Cortesia Gerdau Guaíra)

Foram coletados 30 dados de corridas sucessivas, observando-se previamente a não-existência de fato relevante que eventualmente pudesse esconder, mascarar ou invalidar a medição. Desta forma, suprimem-se as medições relativas a paradas operacionais ou de manutenção. Todas as medições apresentam a mesma carga fria (composição de sucata). Qual seja:

- 40% gusa;
- 16% pacote;
- 07% pacote tesourado;
- 12% especial;
- 07% pesada;
- 04% escava (cavaco de aço)
- 02% escava VS (cavaco de ferro fundido)
- 01% ferro fundido;
- 04% estanhada
- 06% miúda
- 01% outras

Os pontos representam a maior temperatura observada na água de arrefecimento de cada duto, não sendo, entre si, necessariamente medidos no mesmo instante.

Considera-se, assim, que essa temperatura representa a maior transferência de calor retirada de cada duto em uma determinada corrida, representando também o momento mais crítico para o sistema.

Os dutos são numerados, sendo o estudo conduzido para os dutos de número 5 até 22 (totalizando 18 dutos).

A necessidade de substituição do duto ocorre quando a chapa interna, que fica em contato com o gás proveniente do forno, atinge uma espessura inferior a 5mm.

A partir desse ponto, a resistência do material é insuficiente para suportar a pressão da água de refrigeração, fazendo com que o duto entre em colapso, o que impõe a parada de produção para a substituição do duto danificado, com uma perda mínima de 24 horas de produção.

Além da perda de produção necessária para a troca do duto, existe a contaminação do sistema com água, aumentando a umidade do gás, o que pode danificar os elementos filtrantes (mangas) da casa de mangas, por uma reação conhecida por hidrólise.

Para a realização do acompanhamento de desgaste dos dutos, utilizou-se um ultrassom portátil modelo TT300 Marca Ultrasonic Thickness Gauge, seguindo o procedimento abaixo:

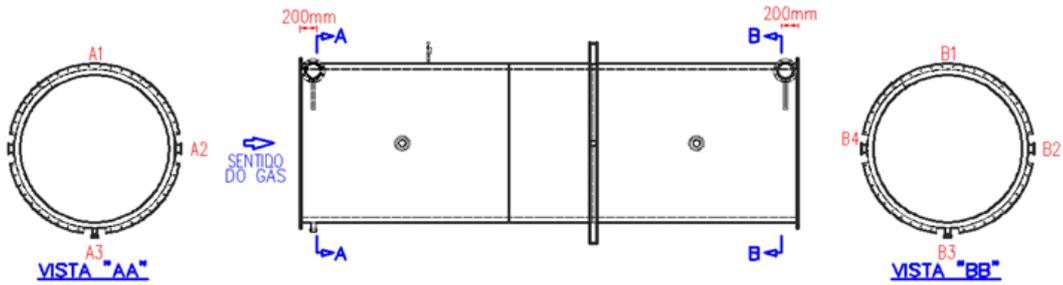
- bloqueio das energias do equipamento;
- acesso ao interior dos dutos por meio das janelas de inspeção;
- preparação da superfície para a medição de espessura;
- registro dos pontos conforme planilha.

As folhas de verificação (Figuras 18 e 19) foram utilizadas para registrar os dados coletados nas medições, padronizando os pontos de coleta. Especifica-se dessa maneira a posição de instalação do duto, a data da medição de espessura, o valor da medição em cada ponto, bem como os responsáveis por esse trabalho.

**FOLHA DE VERIFICAÇÃO - ESPESSURA DAS PAREDES DOS DUTOS RETOS DO SISTEMA
PRIMÁRIO DE DESPOEIRAMENTO - MEDIDAS DE ESPESSURA EM MILIMETROS (mm).**

Emissão: 29/5/2009
 Revisão: -
 Emitente: _____

Dutos Medidos: _____
 Colaboradores: _____
 Responsável: _____
 Data da Medição: ____ / ____ / ____



MEDIÇÃO DE ESPESSURA - ANTERIOR (mm)									
DUTO	DATA	SECÇÃO A				SECÇÃO B			
		A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4

MEDIÇÃO DE ESPESSURA - ATUAL (mm)									
DUTO	DATA	SECÇÃO A				SECÇÃO B			
		A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4

Observações: _____

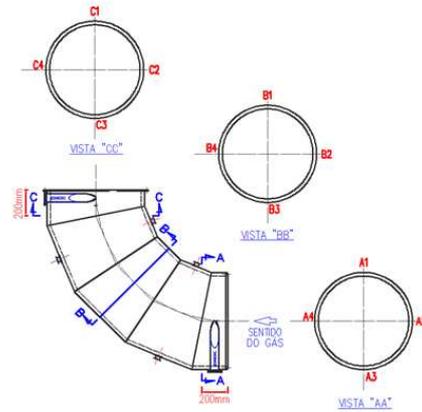
Figura 18 – Folha de verificação de espessura dos dutos

FOLHA DE VERIFICAÇÃO - ESPESSURA DAS PAREDES DAS CURVAS 90° DO SISTEMA PRIMÁRIO DE DESPOEIRAMENTO - MEDIDAS DE ESPESSURA EM MILÍMETROS (mm).

Emissão: 29/5/2009
 Revisão: -
 Emitente:

Dutos Medidos: _____
 Colaboradores: _____
 Responsável: _____
 Data da Medição: ____/____/____

Observações:



MEDIÇÃO DE ESPESSURA - ANTERIOR (mm)													
DUTO	DATA	SECÇÃO A				SECÇÃO B				SECÇÃO C			
		A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4

MEDIÇÃO DE ESPESSURA - ATUAL (mm)													
DUTO	DATA	SECÇÃO A				SECÇÃO B				SECÇÃO C			
		A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4

Figura 19 – Folha de verificação de espessura das curvas

A seguir, é representada a forma de medição nos dutos. A Figura 20 mostra o trabalho em um duto trocado preventivamente.



Figura 20 – Medição de espessura em duto após troca preventiva (Cortesia Gerdau Guaíra)

As Figuras 21 e 22 representam, a título ilustrativo, um duto novo, com espessura nominal, vista interna e vista externa, respectivamente.



Figura 21 – Medição de espessura em duto novo (Cortesia Gerdau Guaíra)



Figura 22 – Duto novo (Cortesia Gerdau Guaíra)

À medida em que o desgaste evolui, a parede interna do duto reduz sua espessura, podendo ocasionar em alguns pontos o rompimento, uma vez que a água está com pressão positiva em relação ao gás. Na Figura 23, pode-se notar o aspecto da falha, bem como o mapeamento de espessura do duto, conforme Figura 24.

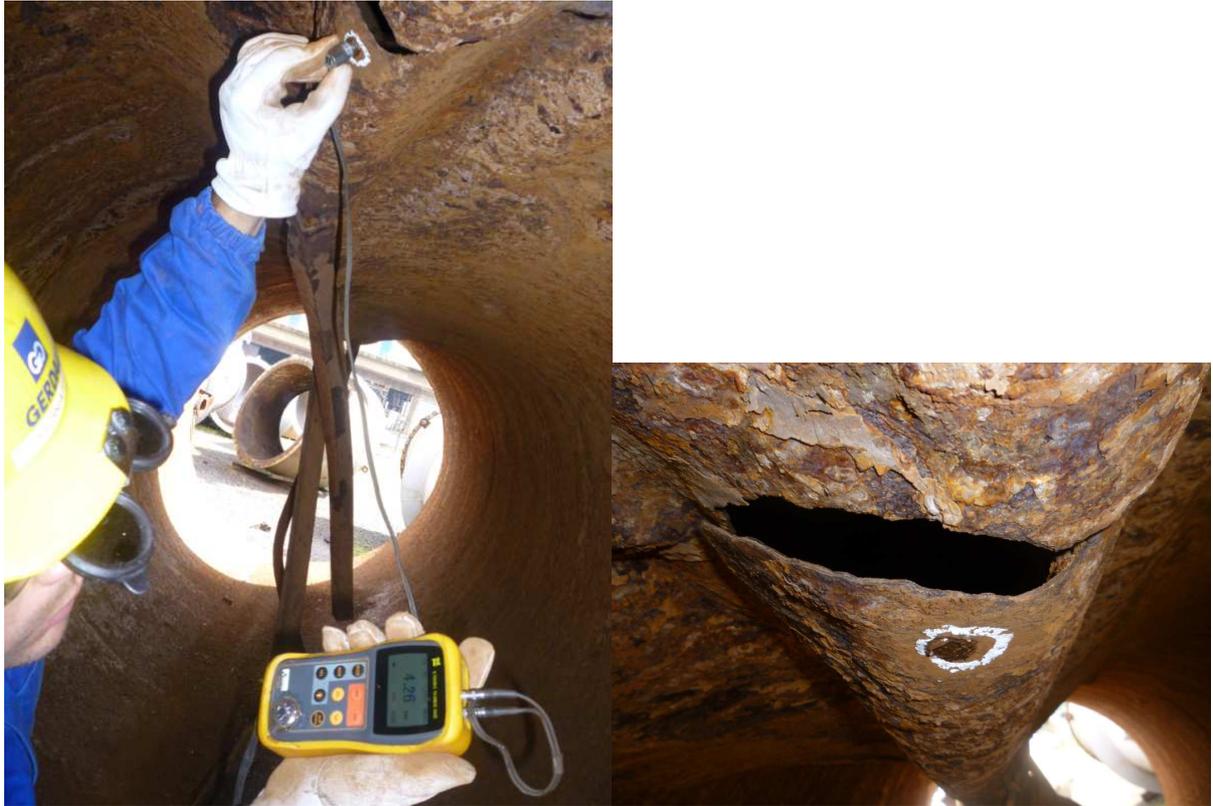


Figura 23 – Medição de espessura em duto rompido após a troca corretiva próximo a ruptura (Cortesia Gerdau Guaíra)

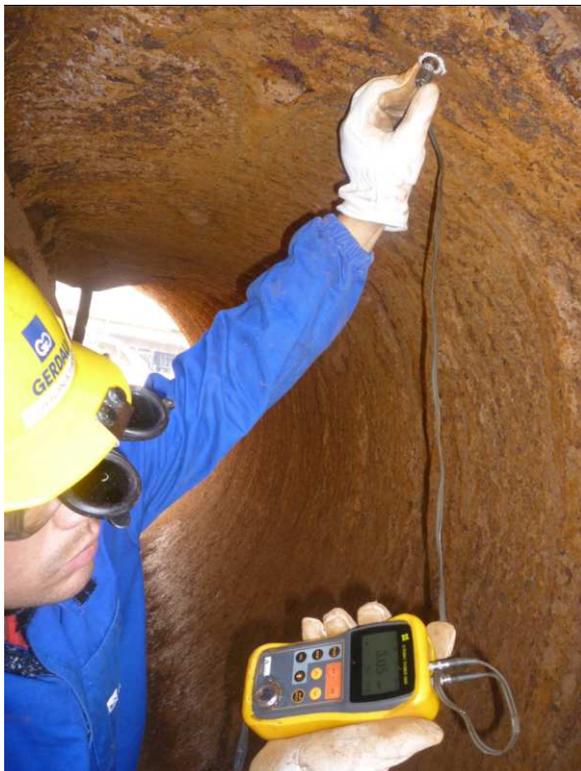


Figura 24 – Medição de espessura em duto rompido após troca corretiva (Cortesia Gerdau Guaíra)

3.4 Termografia dos dutos secos

A partir deste momento, será apresentado o trabalho de verificação do perfil térmico dos dutos no trecho seco.

3.4.1 Equipamentos

Para o mapeamento do trecho seco do despoejamento, foi utilizada a técnica da termografia com auxílio de uma câmera infravermelha (termovisor)(Figura 25).



Figura 25 – Câmera infravermelha

O equipamento apresenta faixa de leitura entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, com uma precisão de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\pm 2\%$ de medição de emissividade de variável, correção 0,1 até 1,0, refletida ambiente.

Uma câmara infravermelha não mede a temperatura, mas sim a calcula. Isso é feito com base na radiação emitida por corpos e informações fornecidas ao equipamento, visando compensar certos pontos que podem afetar os valores, em especial a emissividade.

Assim, é muito importante uma consideração correta do objetivo que leva a efetuar uma termografia. A análise não adequada de termogramas pode causar erros que colocam em risco a integridade das instalações.

O registro obtido através da câmara infravermelha é chamada de termograma ou imagem térmica. Os termogramas normalmente estão acompanhados de imagens convencionais obtidas por meio de máquinas digitais, que visam facilitar o entendimento e localização dos pontos analisados.

Deve-se tomar sempre o cuidado de ler a escala termográfica em cada Figura, pois sempre é tomada a cor branca na imagem como a máxima temperatura da imagem. Logo, a cor branca em uma imagem reflete a máxima temperatura daquela Figura.

3.4.2 Metodologia

As imagens foram obtidas no refino da corrida, momento em que a temperatura é maior, possibilitando a identificação do perfil de temperatura com maior realce.

Na imagem termográfica, é apresentado um quadro ao centro, onde, no canto superior direito, é ressaltada a temperatura dessa região.

Para melhor entendimento, é necessária a apresentação de uma imagem real da mesma região. Dessa forma, por comparação, é possível identificar-se o local exato onde a temperatura apresenta-se mais elevada.

4 Resultados e discussão

4.1 Troca de calor e espessura

A água de arrefecimento dos dutos é direcionada individualmente ou em grupos de dois ou até três dutos. Assim, a medição da vazão de água, conforme apresentado na Tabela 8, é realizada na alimentação do duto.

Tabela 8 – Medição de vazão de água de arrefecimento dos dutos

DUTO	Circunferência Externa mm	Espessura mm	Instalação das Sondas	Distância entre Sondas mm	Vazão Encontrada m³/h ago/09	Vazão Encontrada m³/h dez/09	Vazão média m³/h
5	535	6,75	V	158	155	154	154,5
6	448	6	V	133	171,4	189	180,2
7	448	6,03	V	133	181,8	189	185,4
8 e 9	448	6,25	V	133	172,6	173,5	173,05
10 e 11	448	6,25	V	133	127,4	125,5	126,45
12 e 13	448	6,3	V	133	105	114	109,5
14;15 e 16	448	6,17	V	133	119	121	120
17;18 e 19	448	6,2	V	133	96	92	94
20;21 e 22	448	6,2	V	133	88	88	88

A seguir, são apresentadas na Tabela 9 as medições de temperatura da água de arrefecimento dos dutos.

Tabela 9 – Temperatura máxima de arrefecimento dos dutos por corrida

Registro da Corrida de aço	Alimentação de água	Duto									
		5	6	7	8 e 9	10 e 11	12 e 13	14;15 e 16	17;18 e 19	20;21 e 22	
	TE (Instrumento de controle)										
	523	514	515	516	517	518	519	520	521	522	
Temperatura de entrada da água em °C	Temperatura de saída em °C										
15415012 17/11 13:36 às 15:06	29,33	39,39	37,76	35,43	39,05	40,34	38,02	37,53	52,27	42	
15415013 17/11 15:06 às 16:16	30,73	39,08	35,97	35,86	38,53	38,26	37,53	37,07	51,19	42,01	
15415027 18/11 10:01 às 11:15	28,26	34,43	31,97	33,03	34,35	34,27	33,95	33,1	45,97	38,43	
15415029 18/11 12:35 às 13:53	29,26	37,09	34,62	34,02	36,53	36,66	35,74	35,19	49,2	40,58	
15415042 19/11 07:53 às 09:02	31,86	42,77	39,05	37,98	41,38	42,66	39,98	40,64	55,42	45,23	
15415045 19/11 11:41 às 12:52	31,99	39,72	37,13	37,35	39,82	40,51	38,57	38,44	51,63	42,81	
15415048 19/11 15:28 às 16:36	33,43	44,89	42,08	39,85	44,06	45,04	42,15	42,52	58,41	47,13	
15415059 19/11 16:36 às 17:37	33,59	43,73	41,24	39,39	43,14	43,66	41,17	41,29	55,03	45,52	
15415062 20/11 11:04 às 12:11	31,96	40,64	37,65	37,53	40	40,75	39,07	39	53,83	44,14	
15415078 21/11 10:45 às 11:50	29,03	37,03	34,71	34,14	36,81	37,34	36,49	35,83	50,12	41,36	
15415081 21/11 14:21 às 15:23	29,53	37,06	33,97	34,15	36,39	36,75	35,83	35,22	48,9	40,92	
15415083 21/11 16:34 às 17:40	29,57	38,5	35,71	35,3	38,23	39	37,4	37,59	56	41,97	
15415095 22/11 08:47 às 09:55	29,62	41,63	38,44	35,96	39,84	40,41	38,45	38,06	53,8	42,64	
15415103 22/11 18:16 às 19:23	29,64	38,07	35,8	34,68	36,94	36,41	35,89	35,5	49,28	40,75	
15415121 24/11 10:16 às 11:19	28,02	40	36,7	33,97	38,54	40,27	38,01	36,77	46,29	39,22	
15415123 24/11 12:26 às 13:30	31,61	40,98	38,81	37,11	40,39	40,72	39,37	38,94	47,49	41,32	
15415139 25/11 10:13 às 11:18	29,05	38,61	35,38	34,99	37,73	37,93	36,78	36,01	44,7	43,3	
15415140 25/11 11:18 às 12:22	30,13	39,41	36,69	35,65	38,34	38,92	37,35	36,64	45,41	44,14	
15415141 25/11 12:22 às 13:23	30,14	40,73	37,38	36,21	39,59	40,12	38,51	37,97	47,01	45,24	
15415157 26/11 10:34 às 11:39	30,66	40,4	36,49	36,68	39,34	39,88	38,66	37,27	46,68	45,02	
15415160 26/11 13:44 às 14:49	30,64	43,75	39,58	37,57	41,3	42,94	39,74	38,66	47,77	44,66	
15415161 26/11 14:49 às 15:50	29,63	39,37	35,89	35,43	37,76	38,65	37,84	35,9	46,12	44,67	
15415171 27/11 06:53 às 07:56	27,68	39,08	36,58	33,93	37,75	39,79	37,79	36,11	46,32	43,75	
15415173 27/11 09:05 às 10:07	29,21	37,66	34,34	34,15	36,39	37,08	36,57	34,98	44,3	43,15	
15415186 28/11 04:01 às 05:09	28,73	39,96	36,44	35,03	38,47	39,88	37,86	36,46	45,51	43,7	
15415206 29/11 08:57 às 10:07	27,84	36,14	34,07	32,67	35,13	35,81	35,5	33,39	42,9	41,42	
15415207 29/11 10:07 às 11:15	28,32	36,6	34,62	32,72	35,85	36,27	35,67	33,97	42,79	41,33	
15415208 29/11 11:15 às 12:20	28,83	37,95	36,31	34,31	37,2	37,85	37,05	35,41	44,68	42,85	
15415212 29/11 15:58 às 17:06	30,37	37,73	35,29	34,9	37,03	37,11	36,41	35,52	44,35	43,72	
15415214 29/11 18:17 às 19:22	30,37	39,36	36,66	35,57	38,29	38,76	37,44	36,41	45,83	44,6	

Todo o trabalho de análise dos dados foi executado com a diferença de temperatura da água de entrada e de saída (Δt), obtendo-se, assim, uma independência da temperatura ambiente. Os dados foram colocados em uma carta de controle individual, com ajuda do *software Minitab*, na qual se pode observar a variação Delta t, cujos resultados encontram-se na Figura 26, que representa os resultados do duto nº5. Comportamentos similares apresentam os dutos de números 6 a 16.

Pode-se observar uma variação média de 9,42°C, bem como um limite superior de controle (UCL-*upper control limit*) de 14,71°C, e um limite inferior de controle (LCL-*lower limit control*) de 4,14°C, os quais foram definidos considerando-se 3 desvios padrões da média.

O gráfico seguinte (carta de amplitude móvel), na mesma Figura 26, mostra a variação de cada ponto em relação ao dado anterior, observando-se a variação média de 1,987°C.

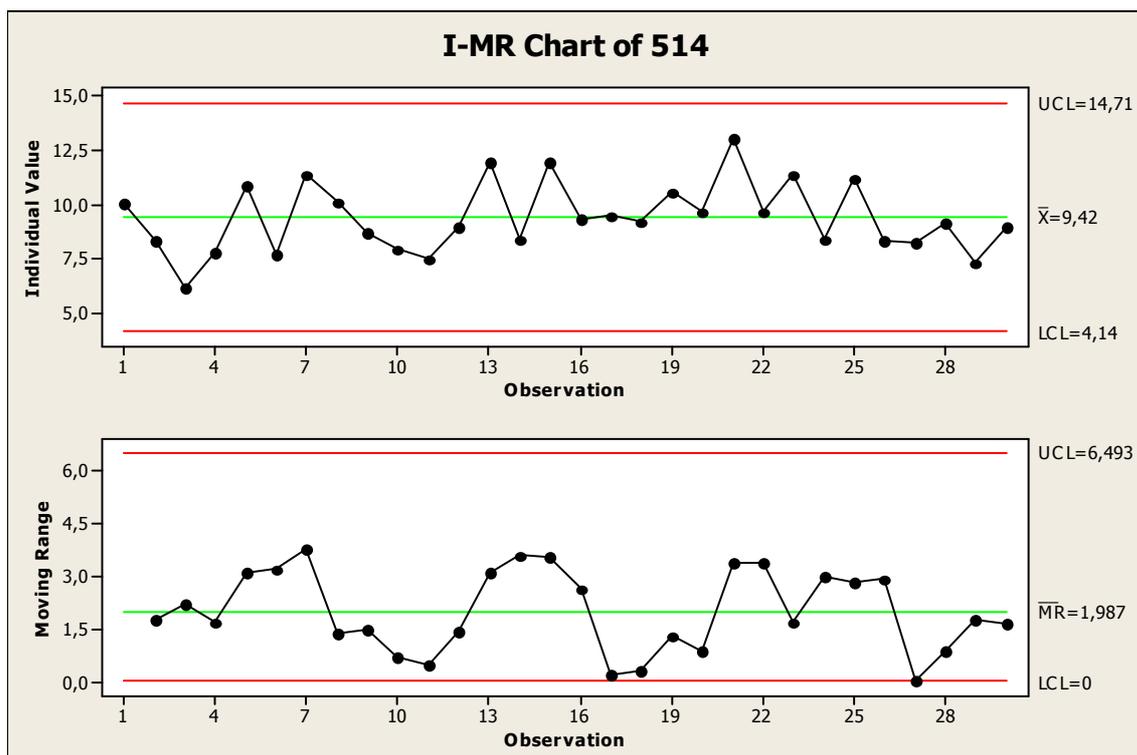


Figura 26 – Carta de controle do duto nº5

Na Figura 27, são apresentados os dados do conjunto de dutos nº17, 18 e 19. Pode-se observar que a média é de 18,67°C, porém com uma clara mudança de patamar de operação na amostra coletada. O limite superior de controle foi definido

em 24,51°C, e o limite inferior de controle definido em 12,84°C. Com relação à carta amplitude móvel, constata-se que a média é de 2,19°C.

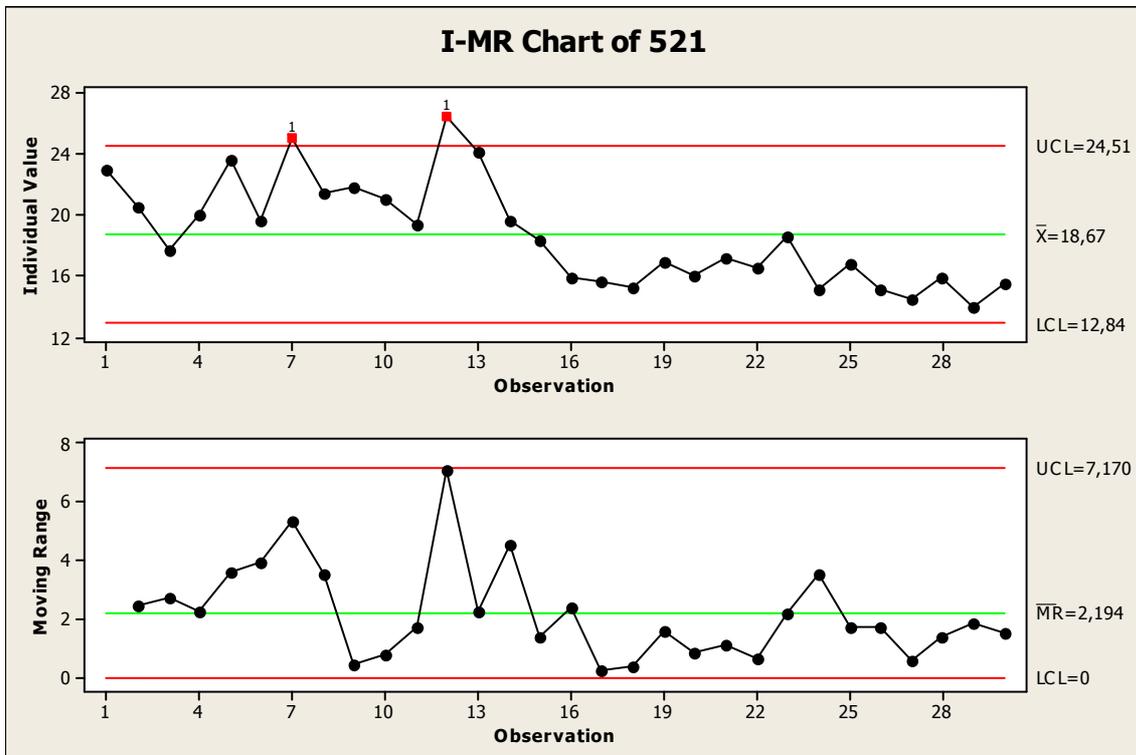


Figura 27 – Carta de controle dos dutos nº17, 18 e 19

Na Figura 28, são apresentados os dados do conjunto de dutos nº20, 21 e 22. A média observada é de 12,952°C. Assim como o conjunto de dutos anteriormente examinado, apresenta uma clara mudança de patamar de operação na amostra coletada. O limite superior de controle foi definido em 16,257°C, e o limite inferior de controle foi definido em 9,646°C. Relativamente à carta amplitude móvel, verifica-se que a média é de 1,24°C. O ponto acima dos limites de 3 sigma na amplitude móvel denota a presença de causas especiais nos dados coletados.

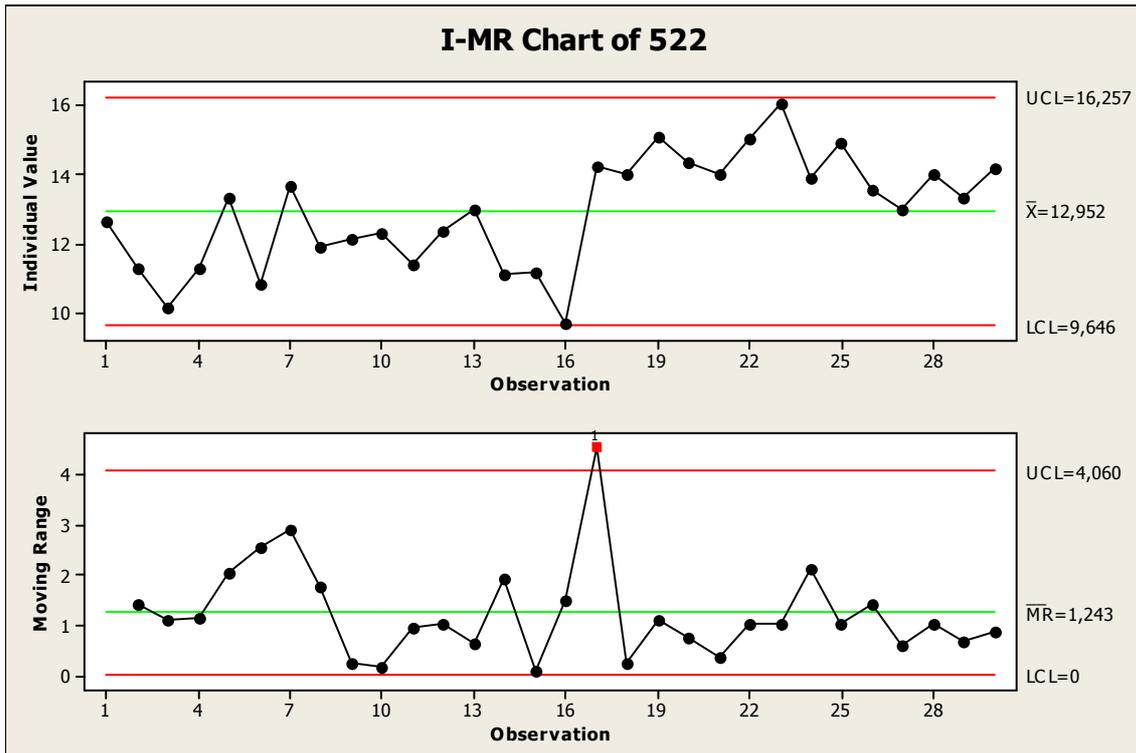


Figura 28 – Carta de controle dos dutos n^o20, 21 e 22

Nas Figuras 29, 30 e 31, verifica-se que os pontos coletados apresentam uma condição normal, representada pelo $P\text{-value} > 0,1$. A normalidade dos dados valida a utilização da ferramenta carta de controle individual e amplitude móvel, exibida anteriormente.

O mesmo comportamento foi observado nos demais dutos (6 a 16), cujos dados, diante da ausência de variação, dispensam apresentação gráfica.

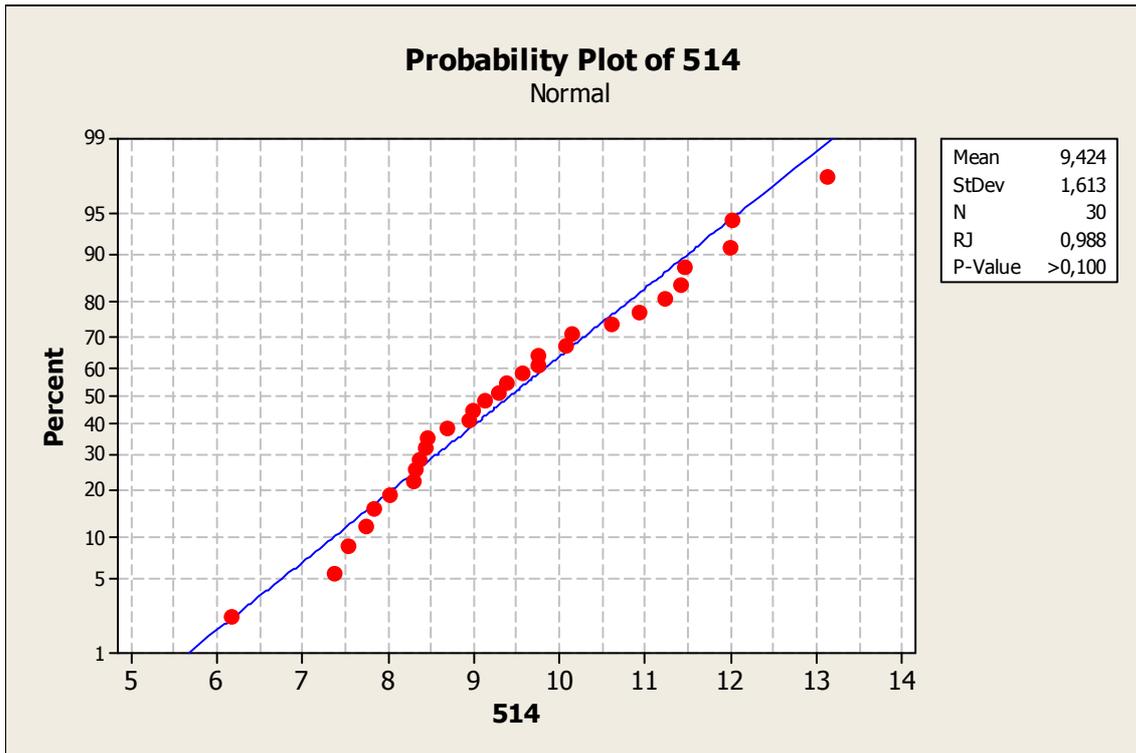


Figura 29 – Distribuição normal dos dados do duto nº5

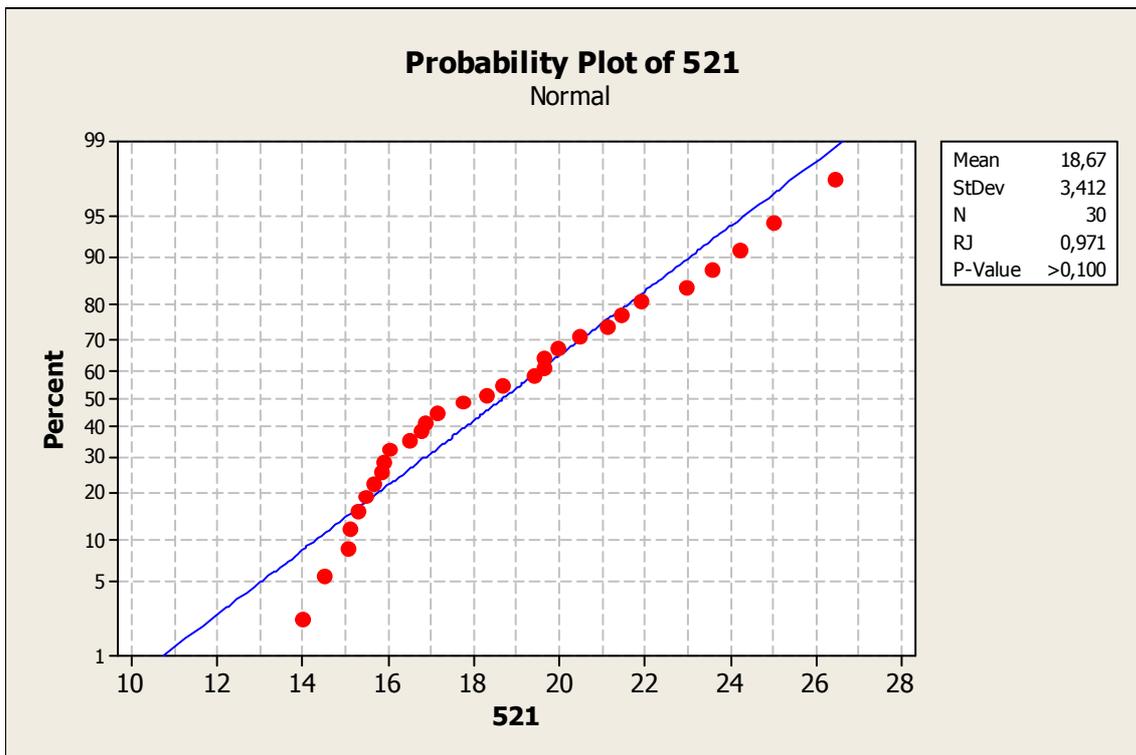


Figura 30 – Distribuição normal dos dados dos dutos nº17, 18 e 19

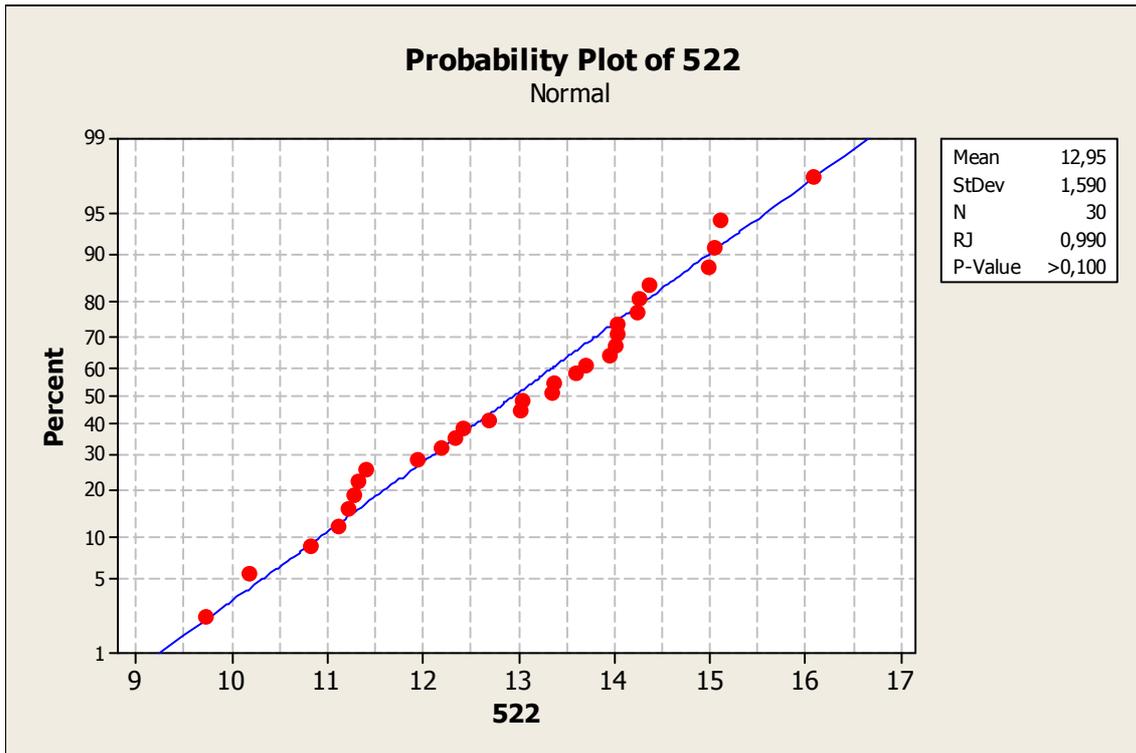


Figura 31 – Distribuição normal dos dados dos dutos nº20, 21 e 22

Já na análise de capacidade do processo, confirma-se a capacidade para os dutos 5 a 16, Figura 32, onde novamente é mostrada somente a Tabela do duto 5, a qual revela a presença de um ajuste adequado entre as curvas *within* e *overall*, representado pelo resultado “Exp. Overall Performance % total =0,11” < “Exp. Within Performance % total= 0,27”.

Novamente utiliza-se o limite de 3 desvios padrões para a análise.

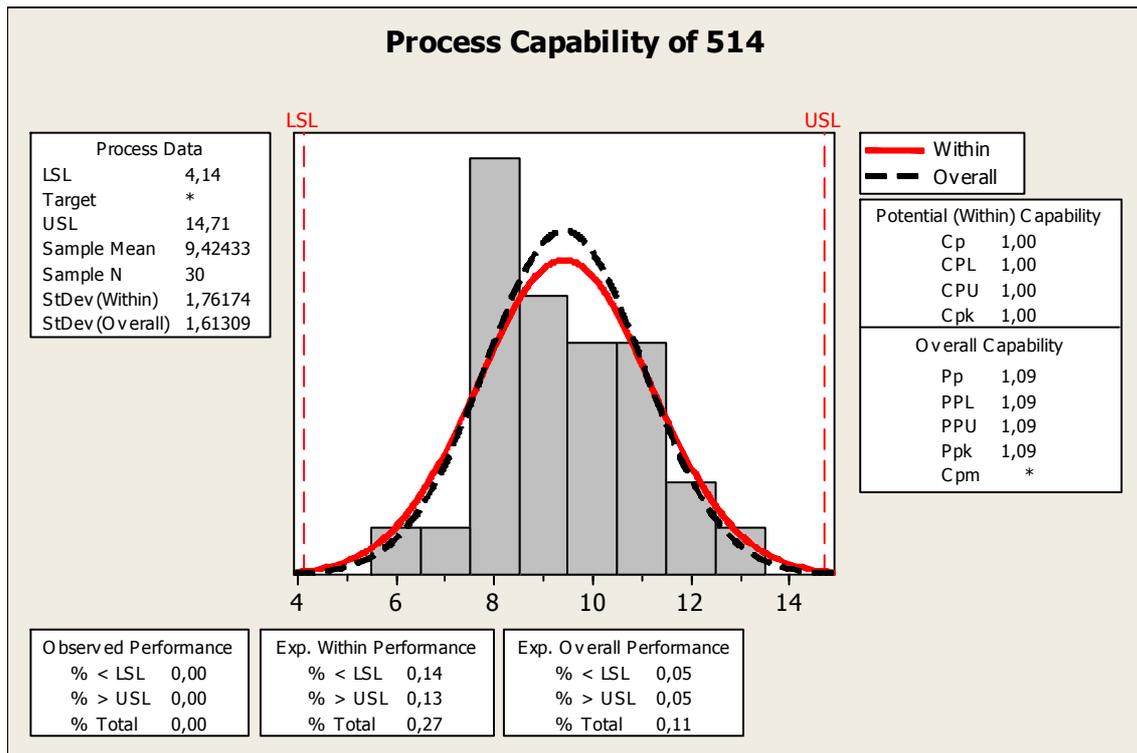


Figura 32 – Capacidade do processo do duto n^o 5

Já nas Figuras 33 e 34, pode-se observar que o ajuste das curvas *overall* e *within* apresenta uma variação representada pelo % total 8,73 e 3,73, respectivamente. Dessa forma, deve-se considerar a existência de variações não aleatórias que denotam a presença de causas especiais nos dados coletados.

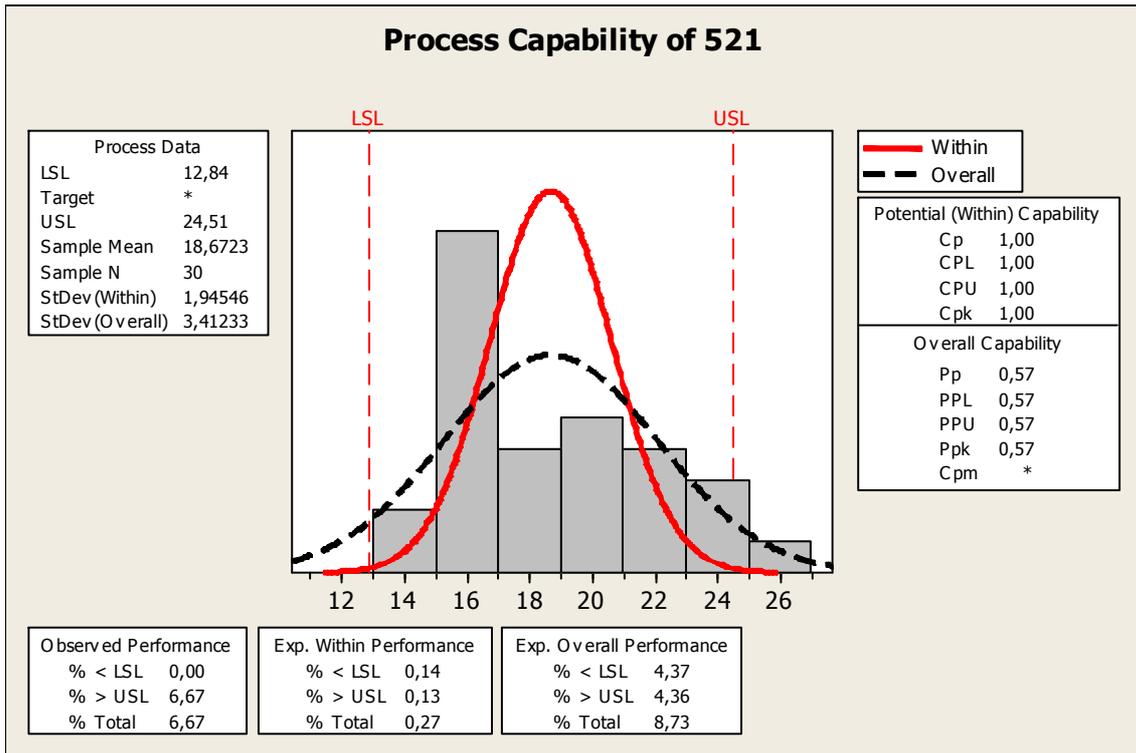


Figura 33 – Capacidade do processo dos duto n°17, 18 e 19

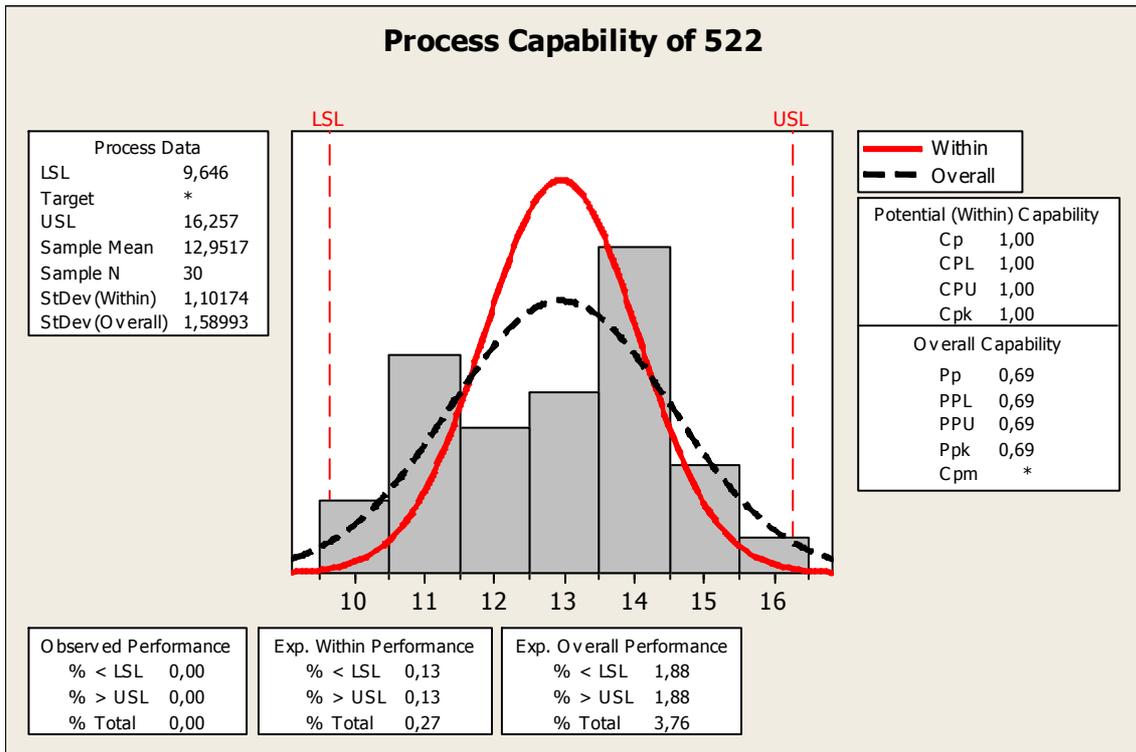


Figura 34 – Capacidade do processo dos dutos n°20, 21 e 22

Assim, a avaliação da transferência de calor foi calculada conforme Tabela 10, utilizando-se os valores médios da vazão e das temperaturas máximas de cada corrida, chegando-se aos dados apresentados na Figura 35.

Tabela 10 – Transferência de calor por metro linear de duto refrigerado

DUTO	Vazão média m³/h	Vazão em gramas / h	calor específico da água Cal/g°C	Temp. Tubulação Entrada °C	Temp. Tubulação Saída °C	DELTA °C	Q=m·c·ΔT kcal/h	comprimento dos dutos metros	Kcal / metro·h
5	154,5	154.500.000	1	29,97	39,39	9,42	1.455.699	4,83	301.387
6	180,2	180.200.000	1	29,97	36,58	6,61	1.190.702	5,862	203.122
7	185,4	185.400.000	1	29,97	35,52	5,55	1.028.723	3,56	288.967
8 e 9	173,05	173.050.000	1	29,97	38,47	8,50	1.471.329	9,66	152.311
10 e 11	126,45	126.450.000	1	29,97	39,13	9,16	1.158.872	9,33	124.209
12 e 13	109,5	109.500.000	1	29,97	37,69	7,72	845.669	9,144	92.483
14;15 e 16	120	120.000.000	1	29,97	36,91	6,94	833.160	13,22	63.023
17;18 e 19	94	94.000.000	1	29,97	48,64	18,67	1.754.980	15,522	113.064
20;21 e 22	88	88.000.000	1	29,97	42,92	12,95	1.139.541	13,974	81.547

Impõe-se observar que as duas últimas medições, conforme apresentado na avaliação de capacidade do processo, apresentam causas especiais, ou seja, ocorreu uma mudança na condição de medição ou do processo. De qualquer forma, é possível verificar uma tendência ao decréscimo da retirada de temperatura por duto, na medida em que estes se afastam do forno fusão.

Observa-se também o acréscimo de temperatura no duto nº7 (primeira curva após a câmara de combustão), sendo que nesse caso a avaliação não denota existência de causas especiais. Torna-se oportuno avaliar esse fenômeno com mais detalhes em trabalhos futuros.

Observa-se, portanto, que a troca térmica através da água de arrefecimento é decrescente com o afastamento do forno fusão.

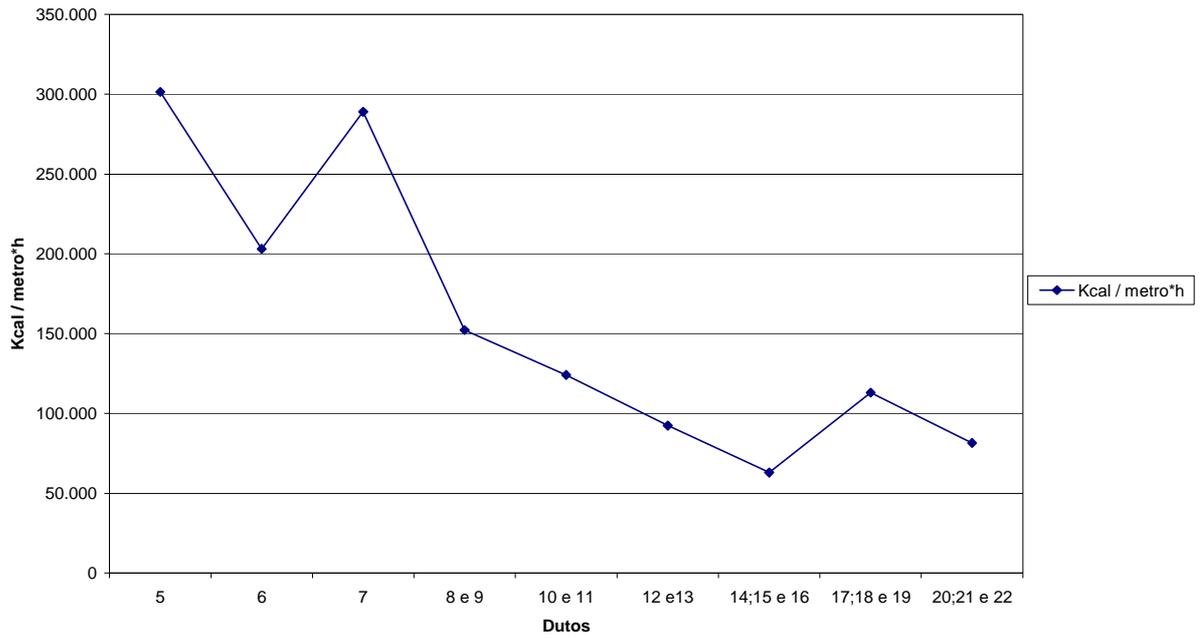


Figura 35 – Transferência de calor por metro linear de duto refrigerado

De posse dos registros de substituição dos dutos, pode-se observar que a frequência de substituição por desgaste é variável de acordo com o aumento da distância do forno vide Figura 36.

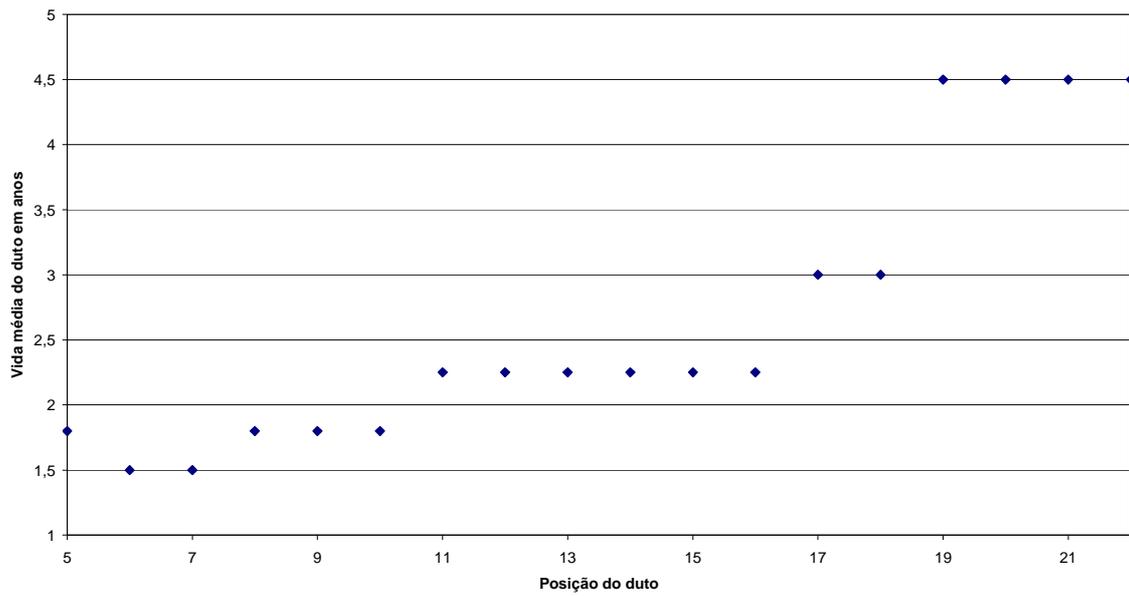


Figura 36 – Vida média dos dutos de acordo com a posição de instalação

Na figura 37 observa-se que o perfil de desgaste é acentuado nos dutos mais próximos ao FEA, além das medidas de espessura foi construída também uma curva típica representando este desgaste.

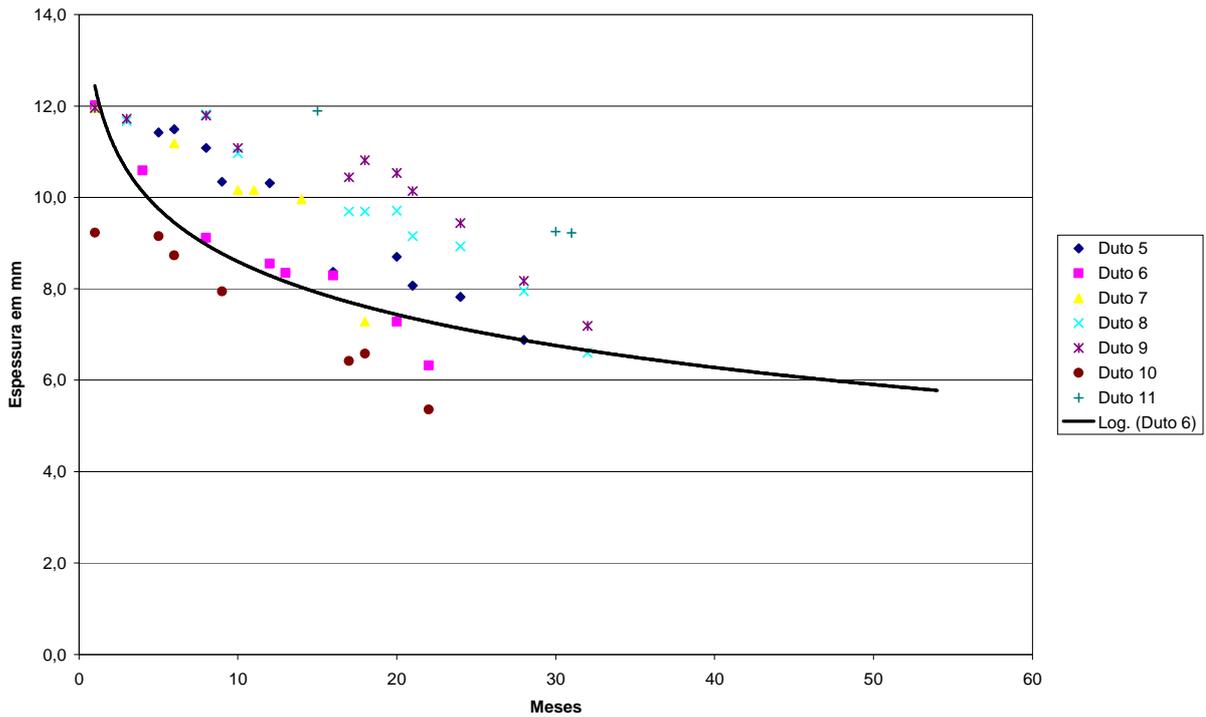


Figura 37 – Acompanhamento de espessura do duto durante 60 meses

Na figura 38, observa-se outro grupo de dutos mais distante do FEA, da mesma forma, foi traçada uma curva típica do desgaste demonstrando uma inclinação menor em relação ao primeiro grupo de dutos mostrado na figura 37.

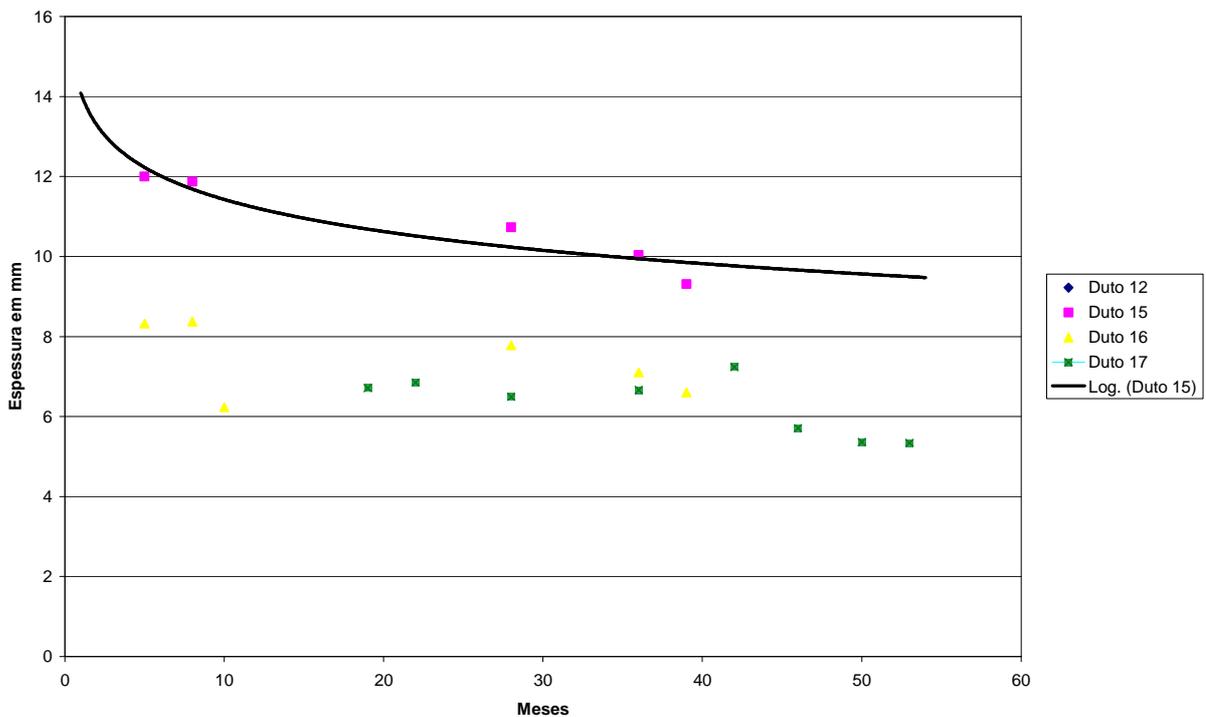


Figura 38 – Acompanhamento de espessura do duto durante 60 meses

Na figura 39, observa-se o último grupo de dutos, da mesma forma, foi traçada uma curva típica do desgaste demonstrando uma inclinação menor em relação ao segundo grupo de dutos mostrado na figura 38.

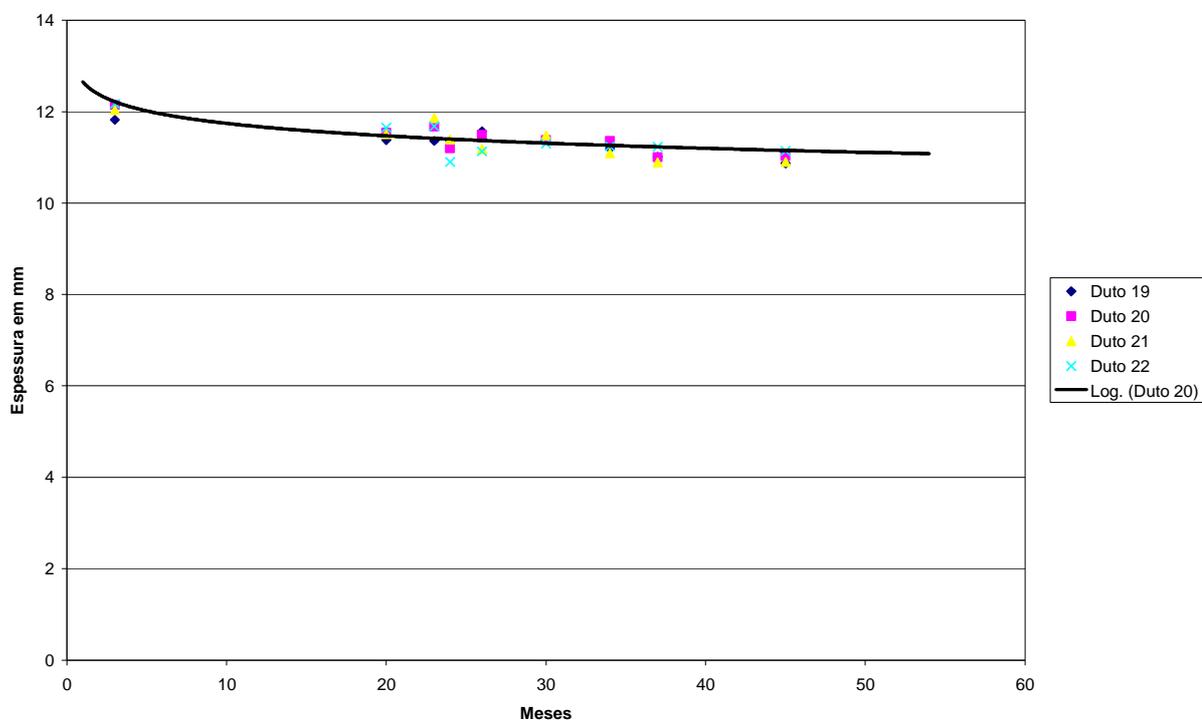


Figura 39 – Acompanhamento de espessura do duto durante 60 meses

Pelos resultados apresentados até o momento, sugere-se a continuidade do trabalho, avaliando outros ganhos possíveis, incluindo a influência da temperatura no desgaste dos dutos.

Pode-se verificar que o perfil de desgaste dos dutos está diretamente relacionado com a posição de instalação.

Deve-se avaliar com cautela os dados de troca térmica dos dutos 17 a 22, devido à presença de causas especiais.

A troca térmica dos dutos é decrescente de acordo com a distância do FEA.

A análise dos dados dos dutos 17 a 22 sugere a existência de causas especiais, a exemplo de injeção de carvão no FEA.

4.2 Termografia

A seguir, serão apresentadas as imagens resultantes da avaliação do perfil térmico com a termovisão, a partir de duas perspectivas: uma que se refere à imagem

da região dos dutos secos, e outra na qual é exibida a respectiva imagem termográfica da região.

Na Figura 40, pode-se verificar a temperatura máxima de 206°C no duto seco, que é a continuação do duto 22, até o encontro com o duto proveniente do sistema secundário, ocorrendo, a partir deste ponto, a mistura dos gases.

Verifica-se uma boa homogeneidade do perfil de temperatura após a mistura dos gases, representada pela cor uniforme da imagem termográfica.

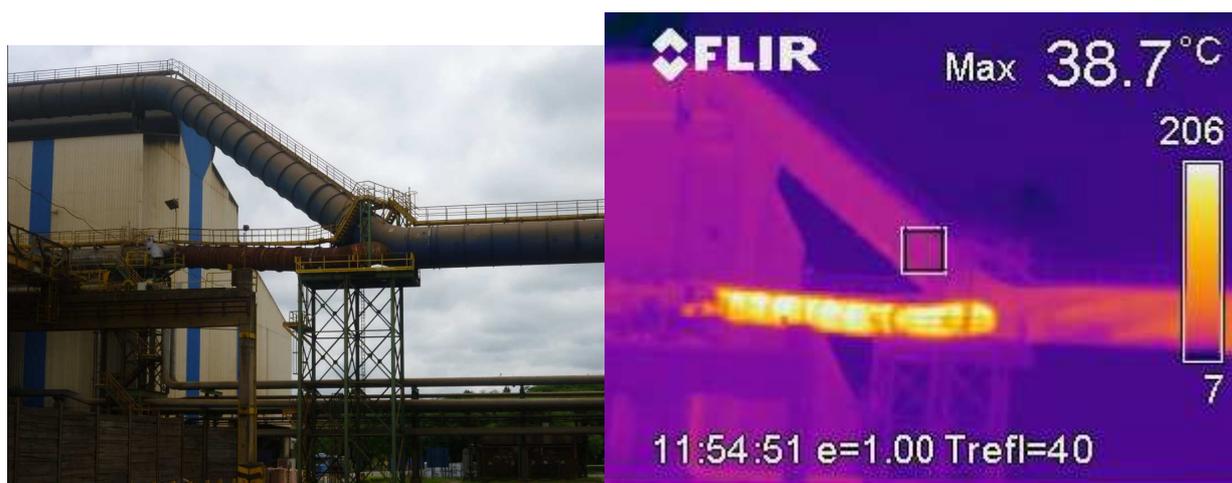


Figura 40 – Junção do duto primário com o duto secundário: vista geral (Cortesia Gerdau Guaíra)

Detalhe da junção entre o duto primário e o secundário pode ser observado nas Figuras 41 e 42, onde a temperatura máxima é de 218°C.



Figura 41 – Junção do duto primário (cor azul) com o duto secundário: detalhe (Cortesia Gerdau Guaíra)



Figura 42 – Junção do duto primário com o duto secundário: mistura dos gases (Cortesia Gerdau Guaíra)

Observa-se que na curva a temperatura atinge 52,2°C (Figura 43)



Figura 43 – Entrada da câmara de mistura (Cortesia Gerdau Guaíra)

Observa-se que existem regiões onde a temperatura é mais baixa, que correspondem à zona de saída dos gases em direção aos ventiladores. Verifica-se também que a temperatura eleva-se para 89,6°C (Figura 44).

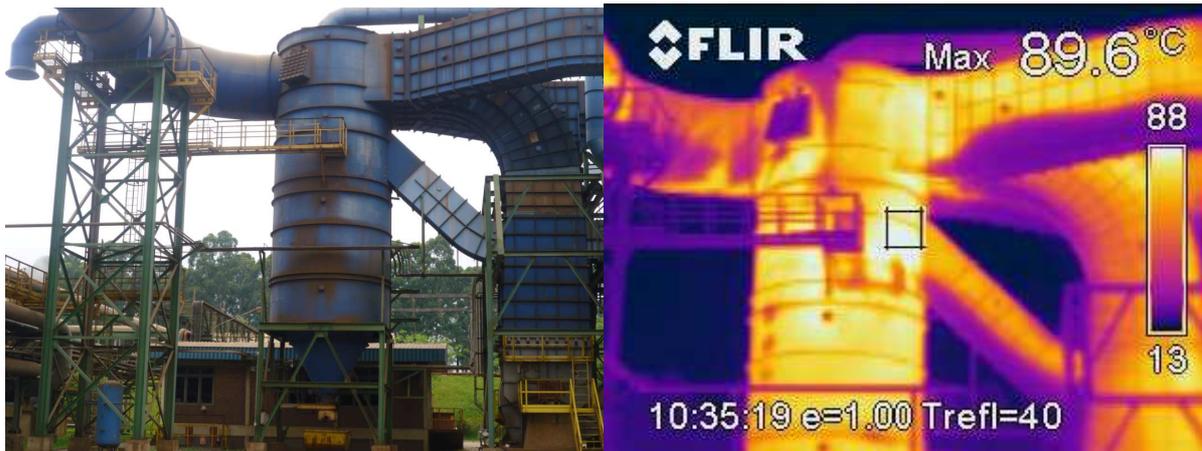


Figura 44 – Câmara de mistura vista frontal (Cortesia Gerdau Guaíra)

Na região do ventilador, pode-se verificar que o perfil de temperatura é uniforme, Figura 45.



Figura 45 – Ventilador principal do sistema (Cortesia Gerdau Guaíra)

Detalhe da região do ventilador: a temperatura observada é na ordem de 89,2°C (Figura 46).

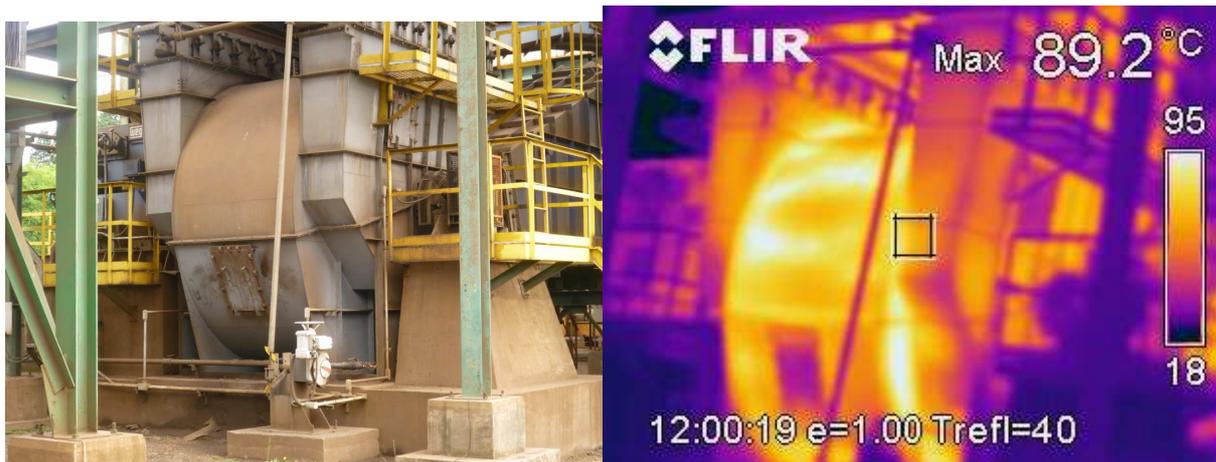


Figura 46 – Detalhe do ventilador (Cortesia Gerdau Guaíba)

A temperatura de entrada da casa de mangas (Figura 47) está em conformidade com os controles existentes.

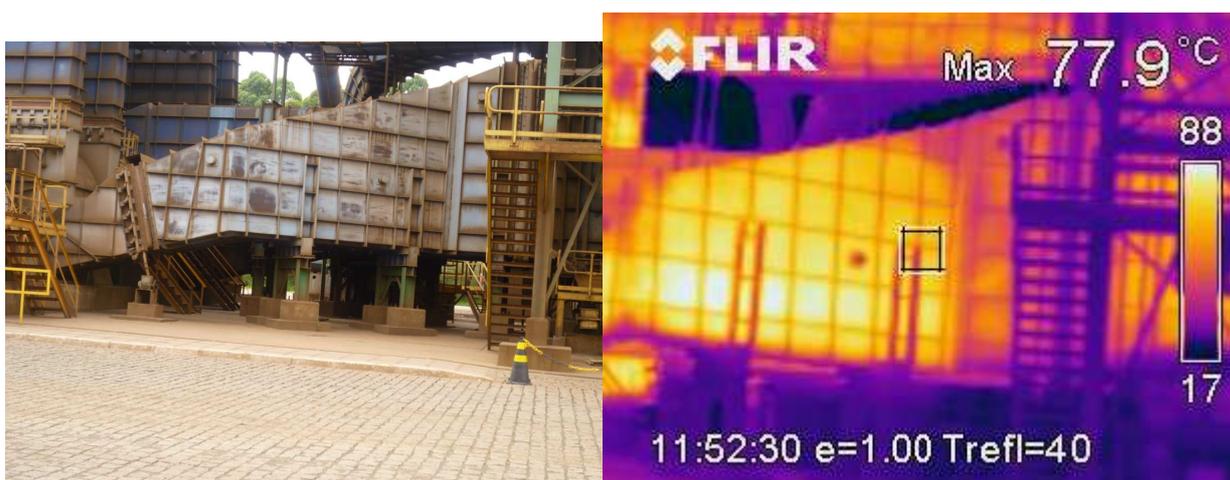


Figura 47 – Duto plenun de acesso à casa de mangas (Cortesia Gerdau Guaíba)

Na região dos cones de coleta de pó, pode-se notar a temperatura desigual em um cone (Figura 48), denotando a possível presença de pó ainda não transferido para o silo de armazenamento.

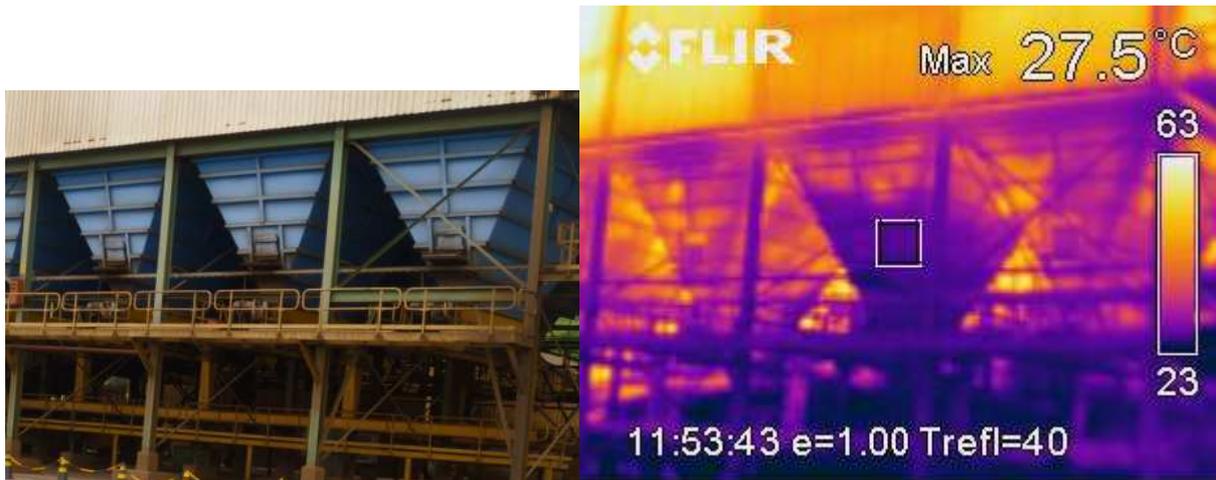


Figura 48 – Vista parcial da casa de mangas - roscas transportadoras de pó (Cortesia Gerdau Guaíra)

A casa de mangas apresenta uma uniformidade de temperatura, conforme mostrado na Figura 49.

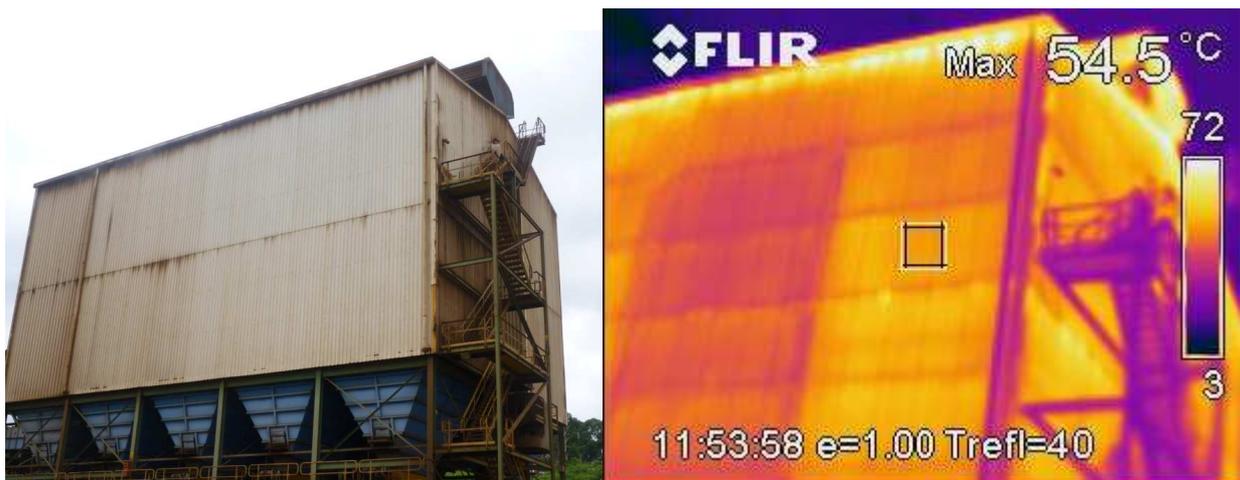


Figura 49 – Casa de filtros mangas, vista frontal (Cortesia Gerdau Guaíra)

A mesma região mais fria é observada no duto posterior, que conduz os gases ao ventilador posterior. Figura 50.



Figura 50 – Câmara de mistura: vista posterior (Cortesia Gerdau Guaíra)

A casa de mangas apresenta a mesma distribuição de temperatura em toda sua extensão, tendo uma temperatura máxima de 81°C (vide Figura 51).

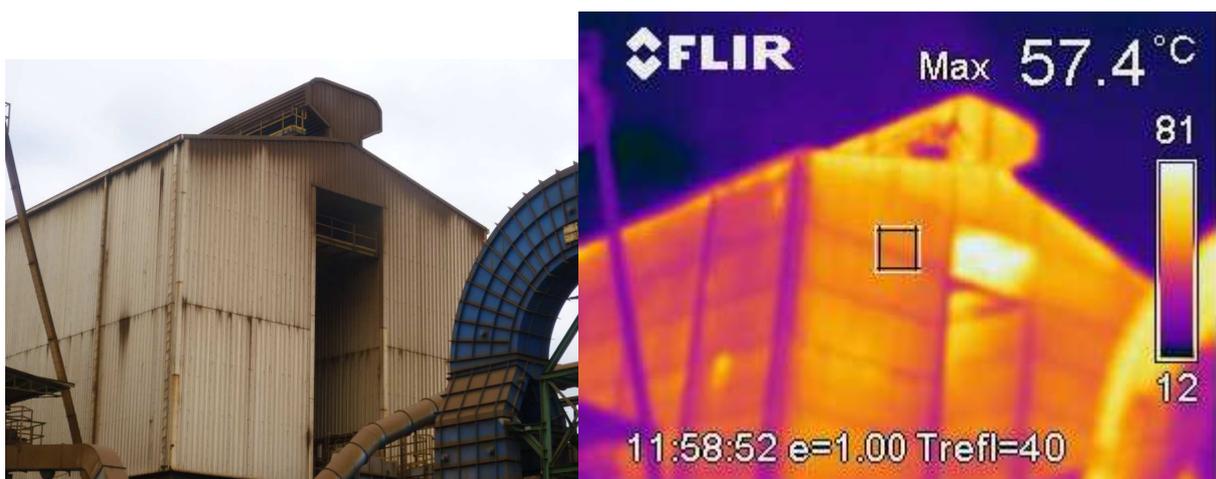


Figura 51 – Casa de filtros de mangas: vista posterior (Cortesia Gerdau Guaíra)

4.3 Discussão geral

Conforme verificado na análise de vida dos dutos refrigerados, quanto maior a distância de instalação do duto, maior sua durabilidade, chegando, no caso dos dutos 19 a 22 a vidas superiores a 4,5 anos de operação do sistema. Atualmente, o duto seco que vem logo após o duto refrigerado apresenta uma temperatura de trabalho da ordem de 206°C, e uma vida média de 2 anos.

É razoável propor sua substituição por dutos também refrigerados, com uma estimativa de ganho de vida para no mínimo 4,5 anos, a exemplo dos últimos dutos

refrigerados. Neste caso, além do custo de instalação, é necessário avaliar o aumento de carga térmica no circuito de água.

Estima-se que a carga térmica máxima agregada ao sistema será da ordem de $81.547 \text{ Kcal/h} * 13$ metros de comprimento do trecho, totalizando $1.060.111 \text{ Kcal/h}$, considerando que a troca térmica do duto seco assumiria comportamento igual ao último duto refrigerado.

Além do ganho em vida útil do duto, evitando indisponibilidades operacionais para substituição, pode-se obter ganhos em desempenho do sistema, através da redução de temperatura dos gases, possibilitando um aumento da vida útil das mangas, uma vez que esta é fortemente impactada pela temperatura de trabalho, conforme McFil (2009).

É claro que também haverá ganhos ambientais, pois o sistema trabalharia sem interrupções, evitadas pelo monitoramento preventivo, permanecendo com sua capacidade máxima de filtração garantida.

Ressalta-se, por fim, que toda a avaliação executada é válida para as condições de carregamento do forno com a carga fria destacada no início.

5 Conclusões

A partir dos dados apresentados, pode-se concluir que:

- A troca térmica dos dutos é decrescente de acordo com a distância do FEA.
- Os gases provenientes do circuito primário tem uma boa homogeneidade do perfil de temperatura após o encontro do duto proveniente do sistema secundário.
- A temperatura da casa de manga apresenta uma temperatura uniforme na região das mangas.
- A temperatura mais elevada é encontrada no duto seco, atingindo até 218°C.
- O perfil de desgaste dos dutos refrigerados está diretamente relacionado com a posição de instalação.

6 Sugestões de trabalhos futuros

Avaliação da utilização da *quenching tower* para controle de temperatura de entrada da casa de mangas.

Estudo da dinâmica do desgaste dos dutos refrigerados (abrasão e corrosão a alta temperatura).

Avaliação da instalação de alarmes na água de arrefecimento dos dutos, com o intuito de medir calor transferido do sistema.

Medir a influência de diferentes cargas frias no sistema de despoejamento.

Estudo da influência da água (hidrólise) nas mangas do despoejamento.

Verificar o controle da queima completa do CO na câmara de combustão.

Avaliar a substituição de um aço mais resistente à temperatura nos dutos refrigerados.

Avaliar a transferência de calor através da água de arrefecimento durante uma corrida inteira.

Avaliar comportamento da transferência de calor nas curvas e na câmara de mistura.

Avaliar a substituição do duto seco por duto refrigerado.

7 REFERÊNCIAS

1. **ACOSTA**, C.D. Sistema de despoeiramento nos fornos da aciaria elétrica da Gerdau Riograndense. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
2. **CHEVRAND**, Lauro José de Sales, Programa de Educação Continuada, Aciaria Elétrica, ABM, 2007.
3. **Classificação de Metálicos**. Módulo treinamento Gerdau, 2007
4. **Especificação Técnica para Sistema de Captação de Pó para Aciaria**. Gerdau 1998
5. **GIL**, Mario. Operação de Fornos Elétricos, Associação Brasileira de Metais, ABM, São Paulo, 1977.
6. **HERSKOVIC**, Jacques. Elaboração do Aço: Fusão e Refino, Associação Brasileira de Metais, ABM, São Paulo, 1976.
7. **HIGGINS, I.; LINDLEY, R.** Morrow, Maintenance Engineering Handbook, 3ª. Ed, McGraw-Hill Book Company.
8. **MACINTYLE**, Archibald Joseph. Ventilação industrial e controle da poluição. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1990.
9. **Mcfil - Tecnologia de Filtração**. Catálogo técnico, 2009.
10. **Programa Seis Sigma**. Treinamento Green Belt, módulo II, 2009
11. **Resolução Nº 382 do Conselho Nacional do Meio Ambiente**, 2006
12. **SILVEIRA**, Rubens Correa da Silveira. Tecnologia de Fabricação do Aço Líquido, UFMG, Volume 3, Belo Horizonte, 1983.
13. **Stantec Fume Control System Process Engineering Report**, Gerdau Guaíra, Stantec Consulting Ltd, 1999.
14. **SUSAKI**, K. Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: 2008. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008.