

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

**DETECÇÃO DE INCLUSÕES TIPO SULFETO DE MANGANÊS EM
LINHA DE INSPEÇÃO AUTOMÁTICA VIA ULTRASSOM**

Katiúscia Costa Nardi

Engenheira de Produção

Dissertação para obtenção de título de

Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia

Porto Alegre - RS

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

DETECÇÃO DE INCLUSÕES TIPO SULFETO DE MANGANÊS EM LINHA
DE INSPEÇÃO AUTOMÁTICA VIA ULTRASSOM

Katiúscia Costa Nardi

Engenheira de Produção

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 - RS

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. Afonso Reguly

Co-orientador: Eng. Ildo Jânio Souza de Oliveira

Banca Examinadora:

Dr. Luis Augusto Colembergue Klujszo

Dr. Rubem Manuel de Braga

Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke

Prof. Dr. Carlos Peres Bergmann

Coordenador do PPGEM

Porto Alegre, 09 de Outubro de 2009.

Dedico esta dissertação às mulheres de minha vida, que fazem a diferença: minha mãe Lelis, minha irmã Isabelle e minha avó Marlene.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Afonso Reguly pela orientação e atenção dedicada.

Ao Eng. Ildo Janio Souza de Oliveira pelo incentivo e disponibilização de tempo para a realização do trabalho

À Eng^a. Ayumi Yoshioka pelo auxílio e correção do trabalho.

Aos futuros Engenheiros Mecânicos Rodrigo Silveira de Souza e Marconi Lanzarini Curtinaz pelos válidos momentos de discussão durante o desenvolvimento deste trabalho e, principalmente, pelo apoio durante a execução dos testes.

Ao Eng. Gustavo Mendes pela disponibilização do equipamento de US automático, aos Eng. Leila Teichmann e Marco Aurelio Ressler Fischer pelo auxílio na análise dos dados.

Aos operadores da Linha de Inspeção Rafael Athanzio Junior, Heron Luiz dos S Ribeiro e os demais operadores que auxiliaram durante a execução dos testes. Ao pessoal do Laboratório Metalúrgico, especialmente ao amigo Jair Leopoldo Janoski.

Aos meus pais Lelis Maria Costa Nardi e Milton Sauer Nardi pelas oportunidades oferecidas durante todo o percurso escolar e, mais importante, pelo amor e carinho dedicados.

Aos meus irmãos Gustavo Henrique Costa Nardi e Isabelle Costa Nardi pelos momentos de alegria e descontração.

Agradeço a minha avó Marlene pelas muitas orações para que todos os meus objetivos fossem alcançados. Também agradeço ao meu avô Aristeu e minha avó Hilda.

Ao meu noivo, Giovani Tadeu Simões Pires Giacomet pelos muitos momentos felizes. Também dedico a ele um agradecimento especial por ser o principal responsável pelo bom andamento deste trabalho.

A Deus.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
SUMÁRIO	VI
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XIV
RESUMO	XVII
ABSTRACT	XVIII
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Ensaios Não Destrutivos	3
2.2 Descontinuidades em barras laminadas	6
2.2.1 Descontinuidades internas tipo inclusão de sulfeto de manganês	8
2.3 Ensaios com ultrassom	10
2.3.1 Ensaios com ultrassom manual	14
2.3.2 Ensaios com ultrassom por imersão	16
2.3.2.1 Parâmetros variáveis do equipamento	19
2.3.2.2 Parâmetros fixos do equipamento	23
2.3.3 Ajuste dos equipamentos manual e automático	23
3.0 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	27
4.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
4.1 Material	31
4.2 Caracterização das descontinuidades	31
4.3 Defeitos artificiais	33
4.4 Descontinuidades reais	33
4.5 Equipamento de inspeção automática	34
4.6 Programação dos testes no equipamento de inspeção por US automático	36
5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1 Avaliação dos dados resultantes do DOE para descontinuidades detectadas na barra padrão mapeada com inclusões tipo MnS	46
5.2 Avaliação dos dados resultantes do DOE para indicações falsas detectadas na barra padrão mapeada com inclusões tipo MnS	50

5.3	Confirmação dos dados obtidos no DOE via avaliação das 32 descontinuidades existentes no lote	53
5.4	Avaliação dos dados obtidos nos testes via Análise dos Sistemas de Medição (MSA)	58
5.4.1	Avaliação dos dados obtidos nos testes via Análise dos Sistemas de Medição (MSA) para os Testes 30, 31 e 100	60
5.4.2	Avaliação dos dados obtidos nos testes via Análise dos Sistemas de Medição (MSA) para os Testes 31, 33 e 100	64
6.0	CONCLUSÕES	67
7.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
8.0	REFERÊNCIAS	71
	ANEXOS	73
	Anexo 1 – Coleta de dados relativa aos Testes 30, 31 e 100 referente à condição com inclusão.....	73
	Anexo 2 – Coleta de dados relativa aos Testes 30, 31 e 100 referente à condição sem inclusão.....	74
	Anexo 3 – Coleta de dados relativa aos Testes 31, 33 e 100 referente à condição com inclusão.....	75
	Anexo 4 – Coleta de dados relativa aos Testes 31, 33 e 100 referente à condição sem inclusão.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema de uma linha de inspeção com diferentes tipos de END. [Elaborado pela autora].....	5
Figura 2.2	Aspecto dos sulfetos alinhados observados. [Elaborado pela autora].....	8
Figura 2.3	Inclusões primárias de MnS. [Brandaleze, 2009].....	9
Figura 2.4	Inclusões secundárias de MnS. [Brandaleze, 2009].....	9
Figura 2.5	Aspectos essenciais para o teste de US. [Elaborado pela autora].....	11
Figura 2.6	Princípio básico da inspeção por US. [Andreucci, 2008].....	12
Figura 2.7	Curva de referência na análise com transdutor normal. [Apostila, 2001].....	14
Figura 2.8	Exemplo de curva DGS para um transdutor de 4 MHz miniatura. [Apostila, 2001].....	15
Figura 2.9	Variações do teste por imersão. [Santin, 1996].....	17
Figura 2.10	Sistema típico de inspeção por imersão com feixe normal à superfície. [Apostila, 2001].....	18
Figura 2.11	Ensaio de US por imersão. A água atua como acoplante, transmitindo a onda sonora até a peça. [Nepomuceno, 1980].....	18
Figura 2.12	Exemplo de curva DAC. [Elaborado pela autora].....	22
Figura 2.13	Medidas do bloco V1 norma DIN 54120. [APOSTILA, 2001].....	24
Figura 2.14	Medidas do bloco V2 norma DIN 54122.[APOSTILA, 2001].....	24
Figura 2.15	Bloco de ajuste FBH.[Berke, 2000].....	26
Figura 2.16	Bloco de ajuste SDH. [ULTRASONIC TESTING LEVEL II, 1998].....	26
Figura 3.1	Diferenças nos sinais de descontinuidades. [Apostila, 2001].....	27

Figura 3.2	Diagrama de Ishikawa. [Elaborado pela autora]	29
Figura 4.1	Análise dos elementos existentes nas descontinuidades do tipo sulfeto. [Elaborado pela autora]	32
Figura 4.2	Barra padrão de ajuste do US automático. [Apostila, 2001]	33
Figura 4.3	Mapeamento da barra padrão com inclusões tipo sulfeto de manganês. [Elaborado pela Autora]	34
Figura 4.4	Visão geral do transdutor – 6 cristais em um mesmo arranjo utilizado, aproximadamente 50 mm. [Elaborado pela autora].....	34
Figura 4.5	Ultrassom disposto na linha de inspeção. [Elaborado pela autora]	35
Figura 4.6	Filtros com excesso de sujeira. [Elaborado pela autora]	36
Figura 4.7	Bucha para acoplamento com a correta dimensão. [Elaborado pela autora]....	37
Figura 4.8	Ajuste do sinal de cada transdutor. [Elaborado pela autora]	39
Figura 4.9	Tela de acompanhamento de inspeção do padrão de ajuste. [Elaborado pela autora]	39
Figura 4.10	Comportamento das transdutores a 50 e 100% da altura da tela do equipamento de US automático. [Elaborado pela autora].....	40
Figura 4.11	Ilustração da curva DAC calculada teoricamente. [Elaborado pela autora].....	43
Figura 5.1	Tela do equipamento de US automático na detecção de descontinuidades na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora].....	46
Figura 5.2	Fatores significativos para descontinuidades detectadas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora].....	47
Figura 5.3	ANOVA ilustrando os fatores e interações de maior significância para descontinuidades detectadas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]	48

Figura 5.4	Interação dos fatores para descontinuidades detectadas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora].....	49
Figura 5.5	Principais efeitos para descontinuidades detectadas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora].....	49
Figura 5.6	Fatores significativos para indicações falsas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora].....	50
Figura 5.7	ANOVA ilustrando os fatores e interações de maior significância para indicações falsas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]	51
Figura 5.8	Interação dos fatores para defeitos falsos na barra padrão mapeada contendo defeitos do tipo sulfeto. [Elaborado pela autora].....	52
Figura 5.9	Principais efeitos para indicações falsas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora].....	53
Figura 5.10	Barra 1 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]	53
Figura 5.11	Barra 2 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]	54
Figura 5.12	Barra 3 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]	54
Figura 5.13	Barra 4 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]	54
Figura 5.14	Barra 5 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]	54
Figura 5.15	Barra 6 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]	54

Figura 5.16	Barra 7 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]	55
Figura 5.17	Barra 8 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]	55
Figura 5.18	Comparativo entre descontinuidades detectadas e indicações falsas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora].....	57
Figura 5.19	Comparativo entre assertividade e indicações falsas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora].....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Descontinuidades superficiais mais comuns em uma indústria siderúrgica. [Elaborado pela autora]	6
Tabela 2.2	Descontinuidades internas mais comuns em uma indústria siderúrgica. [Elaborado pela autora]	7
Tabela 2.3	Comparação entre os tipos de descontinuidades internas mais comuns em uma indústria siderúrgica. [Elaborado pela autora].....	7
Tabela 2.4	Morfologia das inclusões de MnS modificado. [Oikawa, 1995].....	9
Tabela 3.1	Matriz GUT (Gravidade Urgência Tendência). [Elaborado pela autora].....	30
Tabela 4.1	Composição química do aço 15V45.....	31
Tabela 4.2	Elementos residuais do aço 15V45.....	31
Tabela 4.3	Resultado do ajuste em cada transdutor, avaliado em dB's. [Elaborado pela autora]	39
Tabela 4.4	Cálculo da diferença de amplitude em função da distância. [Elaborado pela autora]	42
Tabela 4.5	Estrutura do DOE apresentando fatores e níveis. [Elaborado pela autora]	44
Tabela 5.1	Resposta do DOE na barra padrão mapeada contendo as descontinuidades tipo sulfeto de manganês. [Elaborado pela autora].....	45
Tabela 5.2	Planilha do total de inclusões reais detectadas e não detectadas em cada teste na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora].....	56
Tabela 5.3	Planilha do total de indicações falsas em cada teste na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora].....	56

Tabela 5.4	Dados para a realização do MSA contendo as 32 descontinuidades das 8 barras do lote, considerando também a barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]	59
Tabela 5.5	Dados para a realização do MSA contendo as indicações falsas nos testes com as 8 barras do lote, considerando também a barra padrão mapeada. [Elaborado pela autora]	60
Tabela 5.6	Tabulação cruzada relação entre métodos – resposta do MSA para os Testes 30, 31 e 100. [Elaborado pela autora].....	62
Tabela 5.7	Tabulação cruzada relação com a referência – resposta do MSA para os Testes 30, 31 e 100. [Elaborado pela autora].....	63
Tabela 5.8	Resposta do MSA para os Testes 30, 31 e 100. [Elaborado pela autora].....	63
Tabela 5.9	Tabulação cruzada relação entre métodos – resposta do MSA para os Testes 31, 33 e 100. [Elaborado pela autora].....	65
Tabela 5.10	Tabulação cruzada relação com a referência – resposta do MSA para os Testes 31, 33 e 100. [Elaborado pela autora].....	65
Tabela 5.11	Resposta do MSA para os Testes 31, 33 e 100. [Elaborado pela autora].....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

α	Nível de Significância Estatística
λ	Comprimento de Onda
ϕ	Divergência do feixe
A	Amplitude
ANOVA	Analysis of Variance (Análise de Variância)
AVG	Abstand- Verstarkung- Grosse, ou Distância, Ganho, Tamanho
END	Ensaio Não Destrutivo
C	Circunferência Inspeccionada
CAT	Correção Altura Distância
CD	Coluna D'água
CI	Circunferência Inspeccionada
DAC	Distance Amplitude Correction – Correção de Distância e Amplitude
d	Distância
d_0	Diâmetro
d_1	Diâmetro Menor
d_2	Diâmetro Maior
dB	Decibel
DGS	Distance, Gain, Size – Distância, Ganho, Tamanho
D cristal	Diâmetro do Cristal
Def	Diâmetro Efetivo do cristal
DOE	Design of Experiments (Planejamento de Experimentos)

E	Espessura da Peça
F	Frequência
FBH	Flat Botton Hole
GUT	Gravidade Urgência Tendência
I e I_0	Intensidades Sonoras Medidas em Watt por Centímetro Quadrado
K	Fator de Segurança que Varia em Função da Redução da Intensidade Sônica com a Abertura do Feixe Sônico;
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MnS	Sulfeto de Manganês
NIS	Nível de Intensidade Sonora
N	Campo Próximo
MSA	Análise dos Sistemas de Medição
P	Período
PE	Soma das Proporções Esperadas da Diagonal Principal da Célula (reprovado-reprovado e aprovado-aprovado) Dividido pelo Total Geral
po	Soma das Proporções Observadas da Diagonal Principal da Célula (reprovado-reprovado e aprovado-aprovado) Dividido Pelo Total Geral
SDH	Side Drilled Hole – Furo Lateral (transversal) Usinado
t	Tempo
t	Ciclos/s
TC	Tamanho do Cabeçote
TRP	Taxa de Repetição de Pulso
US	Ultrassom
V	Velocidade
$V_{\text{água}}$	Velocidade do Som na Água

$V_{material}$ Velocidade do Som no Material

V_s Varredura

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo definir a sistemática da correta detecção de indicações de inclusões do tipo sulfeto no aço 15V45 durante a inspeção por ultrassom (US) em linha automática, de forma a garantir uma inspeção confiável, detectando as inclusões existentes com a mínima incidência de indicações falsas. Para atingir o objetivo, os sulfetos foram identificados através da realização do ensaio por ultrassom (US) manual e, por amostragem, foram analisadas as morfologias destas inclusões encontradas via técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para conhecer sua distribuição, visando a definição de testes no equipamento automático. As inclusões do tipo sulfeto são descontinuidades de difícil detecção devido a sua morfologia, semelhante a pequenas trincas ramificadas. Como metodologia para garantir o melhor ajuste do US automático, foi realizado um *brainstorming* de onde surgiram as variáveis com maior impacto na detecção das descontinuidades. Estas variáveis foram computadas e analisadas em um Diagrama de Ishikawa, a partir do qual foram identificados alguns parâmetros do equipamento influentes na falha de detecção das descontinuidades, tais como, rotação, taxa de repetição de pulso, curva de correção altura distância, bem como foram ajustadas as rotinas de limpeza e manutenção. Por fim, foi realizado um estudo de Planejamento de Experimentos para testar estas variáveis e foi elaborado o Plano de Ação. Com o direcionamento correto de todas as ações propostas, a meta do trabalho é garantir uma detecção mais assertiva, buscando (i) evitar a alta incidência de indicações falsas, conhecendo a possibilidade de que o problema não seja eliminado, mas minimizado, principalmente devido a ruídos e vibrações existentes no processo e (ii) reduzir ao máximo a falha na detecção dos defeitos, conhecendo as limitações do equipamento automático e dos defeitos existentes, respectivamente em relação à confiabilidade e à morfologia.

ABSTRACT

This work aims to define a methodology for the correct detection of the sulfide type inclusions in 15V45 steel during the inline ultrasound (US) inspection to ensure a reliable test, detecting the existing discontinuities with the minimum incidence of false indications. To achieve this purpose, the sulfides were first identified through portable ultrasound (US) inspection. Then, some samples were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) technique to evaluate the morphology and the distribution of these discontinuities in order to define the tests parameters for the automated equipment. The difficulty of detection of sulfide inclusions by inline US is due to their morphology, that is similar to branch and discontinuous small cracks. As a methodology to ensure the best online US parameters, brainstorming was used to identify the variables with greater impact in the discontinuities detection. These variables were computed and analyzed in a Ishikawa diagram, in which influential parameters of the equipment failure in the discontinuities detection were identified, such as rotation, pulse repetition rate, time distance curve correction, as well as some cleaning and maintenance routine adjustments. Finally, a design of experiments study was conducted to test these variables, resulting in an Action Plan. With the proper guidance of all proposed actions, the aim of this work is to guarantee a more assertive discontinuities detection, seeking to (i) avoid the high incidence of false indications, knowing the possibility that the problem will not be eliminated, but minimized, mainly due to the process noise and vibration (ii) reduce the discontinuities misdetection, knowing the limitations of the automated equipment and the discontinuities morphology, with the single goal of ensuring customer satisfaction.

1.0 INTRODUÇÃO

O mercado siderúrgico mundial vem enfrentando um contínuo desafio, buscando cada vez mais as melhores práticas, de modo a competir com os melhores preços. Este fato não é diferente para as usinas focadas em aços especiais, principalmente após a entrada da grande potência, China. Determinadas a buscar seu espaço, as organizações siderúrgicas focam seus esforços na redução de ineficiências no processo de fabricação, buscando entregar um produto com baixo custo e alta qualidade.

Atualmente a qualidade não é mais um diferencial, mas uma exigência para qualquer empresa que queira estar apta para concorrer no mercado. Não basta garantir somente o mínimo de defeitos, mas a isenção de defeitos superficiais e a limpeza interna dos aços. Para isso se tornaram necessários estudos a fim de garantir o funcionamento ideal dos Ensaio Não Destrutivos (END).

A utilização de Ensaio Não Destrutivos, definidos pela ASNT (*American Society of Nondestructive Testing*) como a avaliação de determinado objeto que mantém intactas suas características físicas, é amplamente difundida tanto em áreas industriais (aviação, automobilística e alimentos...) quanto humanas (medicina, odontologia...).

Em usinas siderúrgicas, a utilização de equipamentos de inspeção por Ensaio Não Destrutivos automáticos em linha permite uma maior rapidez e confiabilidade na detecção de falhas do processo produtivo, tais como: mistura de materiais, descontinuidades superficiais e internas, medição de bitola.

Dentre os equipamentos acima citados, o ultrassom (US) é um dos melhores da atualidade para a detecção de descontinuidades internas. O US permite a detecção de descontinuidades tipo trincas, porosidades, rechupe e inclusões de diversos tamanhos e formas, em diferentes profundidades, com apresentação imediata de dados e possibilidade de registro. Para o trabalho em questão, os equipamentos de US manual e automático foram utilizados para identificar inclusões do tipo sulfeto de manganês (MnS) em barras do aço 15V45, de bitola com diâmetro de 104 mm.

As descontinuidades do tipo inclusão possuem características muito peculiares de morfologia e alinhamento. Devido a este fator, para que ocorra uma melhor detecção por equipamento automático em linha, se faz necessário o correto ajuste dos parâmetros de ensaio. Assim, o trabalho desenvolvido permitirá inspecionar de forma otimizada evitando a detecção de indicações falsas, ou a aprovação de material com sulfetos acima do limite especificado.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ensaio Não Destrutivo

Os Ensaio Não Destrutivo são métodos para avaliar as características físicas de um determinado material sem implicar em danos para seu uso final. Os END permitem a inspeção de uma peça antes da utilização inicial e também ao longo de sua vida útil, garantindo a qualidade e a integridade física do componente em serviço (REVISTA ABENDE 2008). Na indústria siderúrgica, são utilizados mais comumente métodos de END como correntes parasitas, ensaios visuais, partículas magnéticas, campo de fuga, ultrassom, dentre outros.

Para definir o melhor método de inspeção devem ser considerados os seguintes fatores:

- Tipo de material a ser avaliado: por exemplo, alguns tipos de ensaios solicitam propriedades magnéticas;
- Tipo de descontinuidade a ser detectada e suas propriedades;
- Aplicabilidade do método para a característica que se deseja avaliar;
- Conhecer as limitações do método escolhido;
- Aplicação do produto final;
- Viabilidade econômica em função do retorno.

A seguir serão explanados brevemente alguns dos principais métodos de END nas usinas siderúrgicas, conforme o Guia de END e Inspeção (2008):

No **método de inspeção por correntes parasitas** o campo magnético gerado por uma bobina (ou transdutor), alimentado por corrente alternada, produz correntes induzidas (parasitas) na peça sendo ensaiada. A presença de descontinuidades superficiais e sub-superficiais (trincas, dobras e inclusões), bem como mudanças nas características físico-químicas ou na estrutura do material (composição química, granulação, dureza, têmpera, etc.) alteram o fluxo das correntes parasitas, mudando a tensão induzida e a impedância do

transdutor ou bobina, possibilitando sua detecção. O método é aplicado em materiais ferromagnéticos e não-ferromagnéticos.

Os **ensaios visuais** são indicados para a determinação de descontinuidades visíveis, ou em locais onde não é possível visualizar o local requerido sem desmontar ou abrir o equipamento. Quando necessário, pode-se avaliar a sanidade da peça utilizando transdutores, com câmeras acopladas, permitindo a sua projeção.

O princípio do **método de partículas magnéticas** é detectar descontinuidades superficiais e sub-superficiais tais como trincas, escamas, dobras, inclusões, dupla laminação, em materiais ferromagnéticos. De acordo com McMaster (1963), três operações são necessárias (i) estabelecer um campo magnético com o material a ser testado, (ii) aplicar partículas magnéticas na superfície do material e (iii) analisar o acúmulo de partículas, que indicam a presença da descontinuidade.

Conforme o Guia de END e Inspeção (2008), a detecção ocorre através de um campo magnético gerado na peça, que percorre toda a sua superfície e se desvia ao encontrar uma descontinuidade perpendicular ao seu fluxo, criando uma região de polaridade magnética (campo de fuga). Enquanto a magnetização está presente na peça aplicam-se partículas magnéticas, que são atraídas para o local onde existe o campo de fuga permitindo a visualização da descontinuidade. A fim de gerar a magnetização podem ser utilizados yokes, eletrodos, ou equipamentos de magnetização estacionários.

O **método de campo de fuga** é aplicado para a detecção de descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais magnetizáveis. Conforme Mix (1987), quando existe algum defeito superficial no material a ser inspecionado, ocorrem distorções no campo magnético, detectadas por transdutores e transformadas em sinais eletrônicos. Esta inspeção é automática e peças ruins são segregadas após a marcação do local onde está localizada a descontinuidade. Além disso, trata-se de um processo com maior confiabilidade, pois não depende da avaliação humana.

No **ensaio por ultrassom**, um feixe de energia ultra-sônica é transmitido ao material a ser testado e (i) a energia transmitida através dele é medida, ou (ii) a energia refletida pelas descontinuidades existentes são medidas. Este método é possível porque um feixe ultra-sônico viaja através de determinado material com pouca perda de energia (BIRKS, et al., 1991).

É viável o uso destes equipamentos em escala industrial em uma Linha de Inspeção estática, ou seja, equipamentos para cada tipo de análise dispostos em seqüência enquanto o material produzido segue o fluxo da linha. A vantagem desta maneira de inspecionar é a redução do tempo de inspeção e a confiabilidade, podendo absorver a necessidade de 100% de inspeção requerida principalmente pela cadeia automotiva, a fim de atender as exigências da norma ISO/TS 16949. A Figura 2.1 exemplifica uma das formas de utilização destes equipamentos para a inspeção de barras laminadas, em linha:

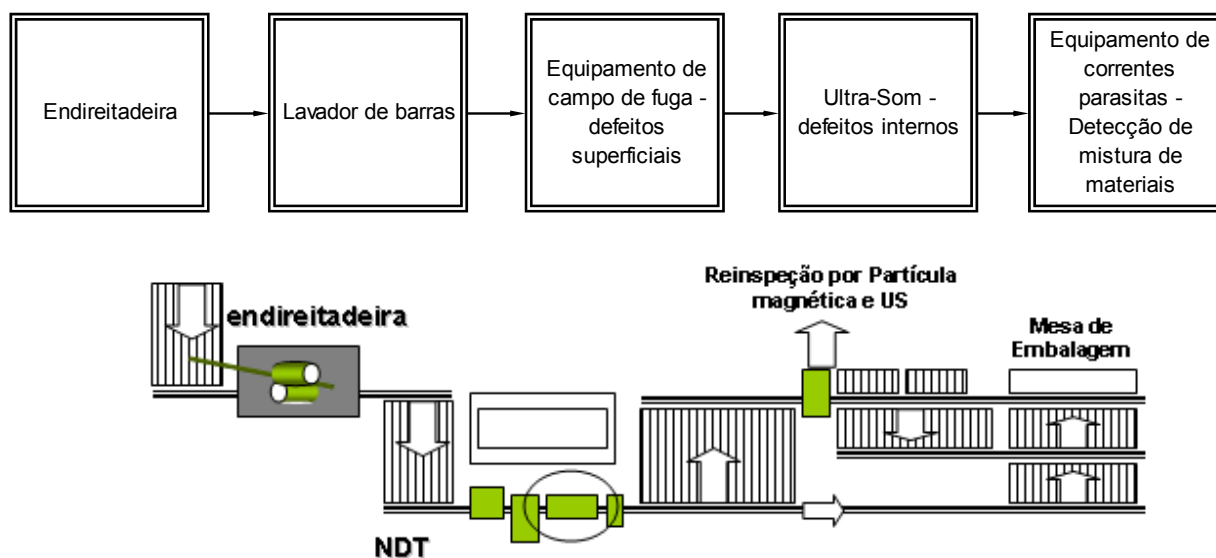


Figura 2.1 Esquema de uma linha de inspeção com diferentes tipos de END. [Elaborado pela autora]

A endreitadeira, como o próprio nome sugere, é utilizada para endireitar as barras laminadas, com o objetivo de impedir que o material torto possa danificar os equipamentos de inspeção.

Visando eliminar a poeira existente no material que permanece algumas vezes em estoque ao ar livre, pode ser instalado um lavador e secador de barras, pois a entrada desta sujeira forma uma espécie de lama no túnel de água do US prejudicando seu bom funcionamento.

Os END propriamente ditos, deste exemplo, são os equipamentos para detecção de discontinuidades superficiais, internas e mistura de materiais. Este último é utilizado para identificar se o feixe de materiais que está sendo produzido tem a mesma composição química e não foi misturado durante os processos anteriores.

Ao final da linha de inspeção, é indicada a existência de uma cabine de inspeção por partículas magnéticas dedicada à avaliação de descontinuidades superficiais e sub-superficiais e a existência de um US manual para a avaliação de descontinuidades internas. Assim, os materiais rejeitados poderão ser destinados para recuperação, ou sucateamento.

2.2 Descontinuidades em barras laminadas

As barras laminadas, devido às condições do processo, manuseio e transporte, podem apresentar diferentes tipos de descontinuidades, sejam superficiais ou internas. Estas devem ser identificadas e caracterizadas para o tratamento de suas causas, buscando um maior conhecimento do processo de fabricação para minimizar estas perdas.

Muitas vezes as descontinuidades não são visualizadas imediatamente após a Laminação, assim, a maioria dos produtos passa pela inspeção em linha, provida de equipamentos de END adequados para cada tipo de necessidade que visam à detecção e remoção destes defeitos.

Em uma empresa siderúrgica, as descontinuidades mais encontradas em barras laminadas são classificadas como superficiais e internas. As Tabelas 2.1 e 2.2 apresentam estas descontinuidades classificadas segundo sua forma, origem, causas e modo de detecção. Também existem outros problemas de menor incidência que podem ser encontrados como a mistura de materiais e ovalização.

Tabela 2.1 Descontinuidades superficiais mais comuns em uma indústria siderúrgica.
[Elaborado pela autora]

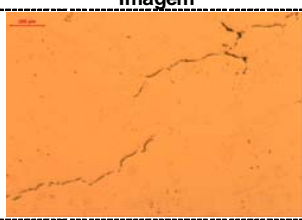
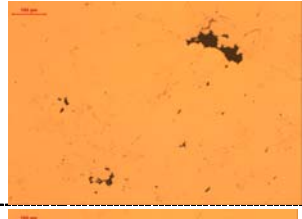


	Trincas	Escamas	Dobras	Riscos
Forma	Distribuição uniforme, longitudinais / transversais	Distribuição aleatória, irregular	Distribuição uniforme, longitudinal	Distribuição aleatória, longitudinal
Origem	Aciaaria Laminação Tratamento Térmico Trefilação	Aciaaria Laminação	Laminação	Laminação Trefila Transporte Manuseio
Causas	Tensões no material	Marcas mecânicas no contato do material com os equipamentos (cilindros desgastados, manuseio...)	Falhas no processo de laminação (preenchimento, alinhamento, ajuste)	Processos de Laminação e trefila, atritos durante o transporte/manuseio
Detecção	Líquido Penetrante Partículas Magnéticas Correntes Parasitas	Correntes Parasitas Partículas Magnéticas	Correntes Parasitas Partículas Magnéticas	Visual Correntes Parasitas Partículas Magnéticas

Tabela 2.2 Descontinuidades internas mais comuns em uma indústria siderúrgica.
[Elaborado pela autora]

	Trincas	Macroinclusões	Flocos	Porosidade	Vazio
Localização	Interno (90% das ocorrências no centro do material)	Variada	Trincas internas aleatórias	Centro do material	Centro do material
Origem	Lingotamento Laminação Tratamento Térmico Trefilação Refriamento de Tarugos	Aciaria	Aciaria	Aciaria - Lingotamento	Aciaria - Lingotamento
Causas	Tensões no material	Diversas falhas no processo de Aciaria	Desgaseificação ineficiente	Problemas no processo de solidificação do material	Falha na solidificação associada a um baixo grau de redução
Deteção	Ultra-Som	Ultra-Som Partícula Magnética	Ultra-Som	Ultra-Som	Ultra-Som

Na Tabela 2.3 são exemplificados alguns dos tipos de descontinuidades internas apresentadas na Tabela 2.2, mostrando sua microestrutura, analisada através de microscópio eletrônico.

Tabela 2.3 Comparação entre os tipos de descontinuidades internas mais comuns em uma indústria siderúrgica. [Elaborado pela autora]

Tipo de Defeito	Imagem
Trinca interna	
Macroinclusão	
Porosidade	
Sulfeto alinhado	

2.2.1 Descontinuidades internas tipo inclusão de sulfeto de manganês

Na maioria das vezes as causas das descontinuidades são identificadas, mas nem sempre se consegue eliminá-las rapidamente, devido a diversos fatores, tais como, composição química do material, necessidade de elevados investimentos, incapacidade do equipamento, dentre outras. Por isso é necessário que estas sejam detectadas pelos equipamentos de END, sempre buscando entregar um produto em conformidade com as especificações dos clientes.

No estudo em questão, a descontinuidade a ser detectada é a inclusão do tipo sulfeto de manganês (MnS) alinhado, conforme mostra a Figura 2.2, analisada em microscópio de varredura eletrônica (MEV). O elemento Enxofre é adicionado na produção para prover características de usinabilidade, requerida pelo cliente. Para que não haja a ligação de Enxofre com o Ferro, prejudicial pela formação de sulfeto de ferro com baixo ponto de fusão, propício para a ocorrência de trincas de tensão, é adicionado o elemento Manganês, por isso a ocorrência de inclusões de sulfeto de manganês, menos crítico em questões de descontinuidades.

As inclusões de MnS podem ser originadas em diferentes fases, gerando sulfetos de diversas morfologias no produto laminado, como pode ser observado na Tabela 2.4, baseada nas considerações de Oikawa (1995).

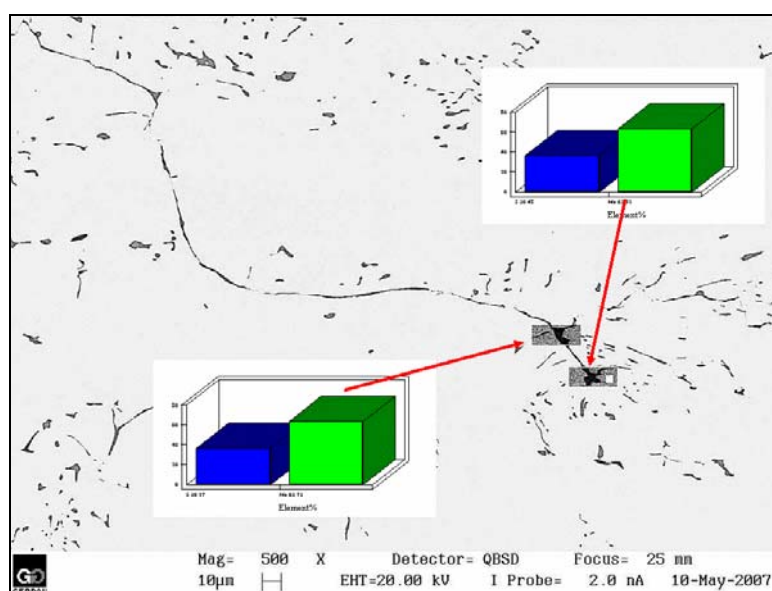


Figura 2.2 Aspecto dos sulfetos alinhados observados. [Elaborado pela autora]

Tabela 2.4 Morfologia das inclusões de MnS modificado. [Oikawa, 1995].

		Banhos com baixo teor de S		
		Morfologia	Descrição	
Morfologia das inclusões de MnS	Inclusões secundárias de MnS	Globular	O líquido segregado se transforma em Fe puro e líquido com alto teor de S	
		Cilíndrica	O líquido segregado se transforma em Fe puro e MnS sólido	
		Espinha de peixe	Eutético irregular	
			Banhos com alto teor de S	
	Fase primária de cristalização MnS	Morfologia		Descrição
		Esférica	Formada durante a separação da fase líquida	
Dendrítica		Crescem em um líquido altamente supersaturado		
Angular	Crescem em um líquido de baixo grau de saturação			

De acordo com a Figura 2.3, existem diferentes morfologias de formação de inclusões primárias de MnS, mostradas respectivamente como tipo (i) esféricas, (ii) dendríticas e (iii) angular, descritas na Tabela 2.4.

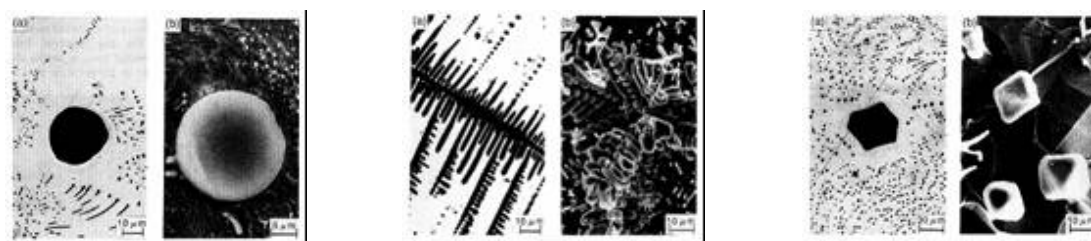


Figura 2.3 Inclusões primárias de MnS. [Brandaleze, 2009]

De acordo com a Figura 2.4, também existem diferentes morfologias de formação de inclusões secundárias de MnS, mostradas respectivamente como tipo (i) monotética (globular), (ii) eutética (cilíndrica) e (iii) eutética irregular (espinha de peixe), descritas na Tabela 2.4.

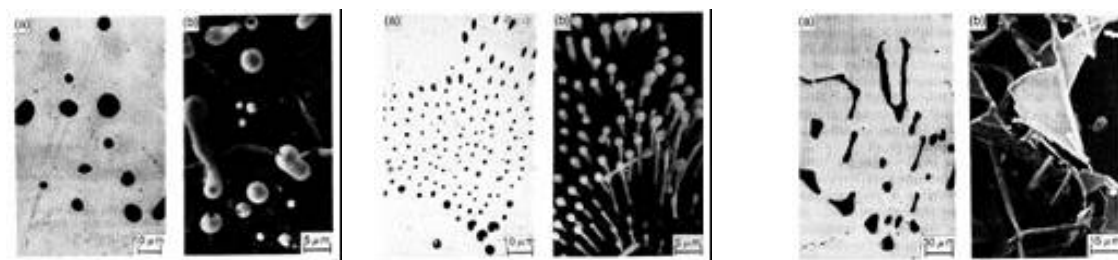


Figura 2.4 Inclusões secundárias de MnS. [Brandaleze, 2009]

As possíveis causas para a propagação destas descontinuidades são (Brandaleze, 2009):

- Presença de H: as inclusões de MnS são um local de potencial retenção de H, que podem gerar microporosidades na interface das inclusões, ou acúmulo nestas zonas de alta deformação;
- Presença de Mn, que ativa a absorção de H;
- Presença de Cr, V e Mo que podem gerar precipitados;
- Presença de N, que pode formar carbonitreto, ou nitretos.

Após a laminação, a morfologia final dos sulfetos é determinada pela plasticidade correspondente à matriz, à temperatura de laminação e à composição química do aço.

2.3 Ensaio com ultrassom

O campo da acústica começou a ser desenvolvido ainda na antiguidade, enquanto estudos com foco em Ensaio Não Destrutivo só foram iniciados no século 20 e desde 1930, o US tem sido amplamente utilizado na detecção de descontinuidades. Somente em desenvolvimentos recentes o termo ultrassom (US) tem sido associado a estudos acústicos de alta frequência (BIRKS et al., 1991).

O US opera através da introdução de um feixe sônico de alta frequência no material a ser inspecionado. Este feixe pode ser utilizado para detectar descontinuidades internas, superficiais, medir espessura, definir tamanho de grão, estrutura, dentre outros. Através deste ensaio também pode ser definida a localização destas descontinuidades, via análise do som que é refletido pelas interfaces. Descontinuidades como trincas internas, porosidade, inclusões, dentre outras, atuam como interfaces refletoras devido às diferentes impedâncias acústicas, com diferentes velocidades de propagação do som.

Com a informação do tipo de descontinuidade que se quer inspecionar e do tipo de material para a definição de velocidade de propagação de onda, que é diferente para cada material, e ajuste do equipamento, três fatores marcam o ponto inicial para a detecção e avaliação das descontinuidades desejadas: tipo de onda a ser utilizada, transdutores mais indicados e mostradores para avaliação do resultado, conforme Figura 2.5.

Para transmitir o som ao material é necessário o uso de um acoplante já que a camada de ar existente entre transdutor e peça não permite esta transmissão pela grande diferença de impedância acústica. Existem acoplantes ideais tabelados para permitir que esta taxa de transmissão seja adequada para realizar a leitura das discontinuidades.

Na Figura 2.6 observa-se a avaliação de uma peça metálica. O transdutor normal é colocado sobre a peça utilizando determinado acoplante, que permite a transmissão das ondas sonoras longitudinais nesta, que é um meio elástico. Ao deparar-se com uma discontinuidade, esta onda é refletida de volta ao transdutor, que converte a energia mecânica em elétrica, indicando um sinal no aparelho que informa a posição e profundidade da discontinuidade.

Para o caso estudado será utilizado o mostrador do tipo A-scan que permite a análise do tamanho das discontinuidades pela comparação da altura de seu eco com outro refletor de tamanho conhecido. Já a profundidade da discontinuidade é determinada pela leitura de uma escala graduada. Tudo isso é possível devido ao ajuste do equipamento, que fornece uma base comparativa.

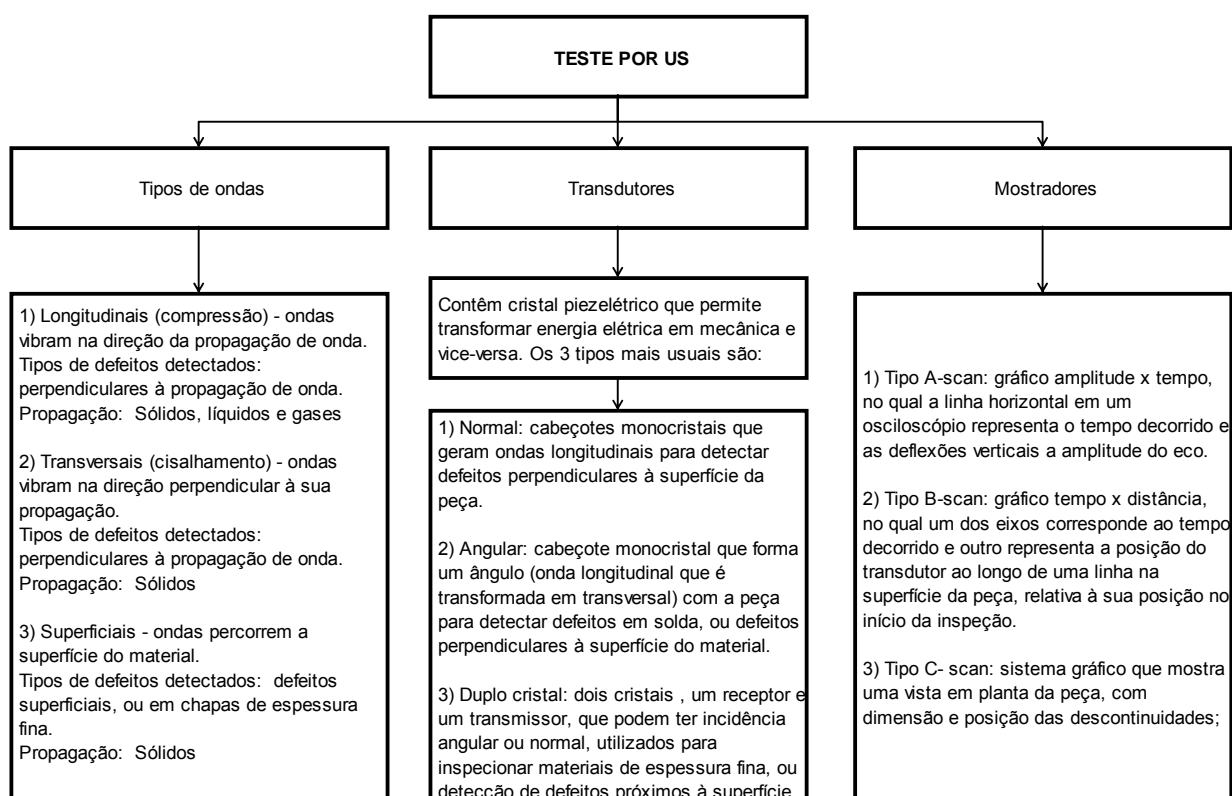


Figura 2.5 Aspectos essenciais para o teste de US. [Elaborado pela autora]

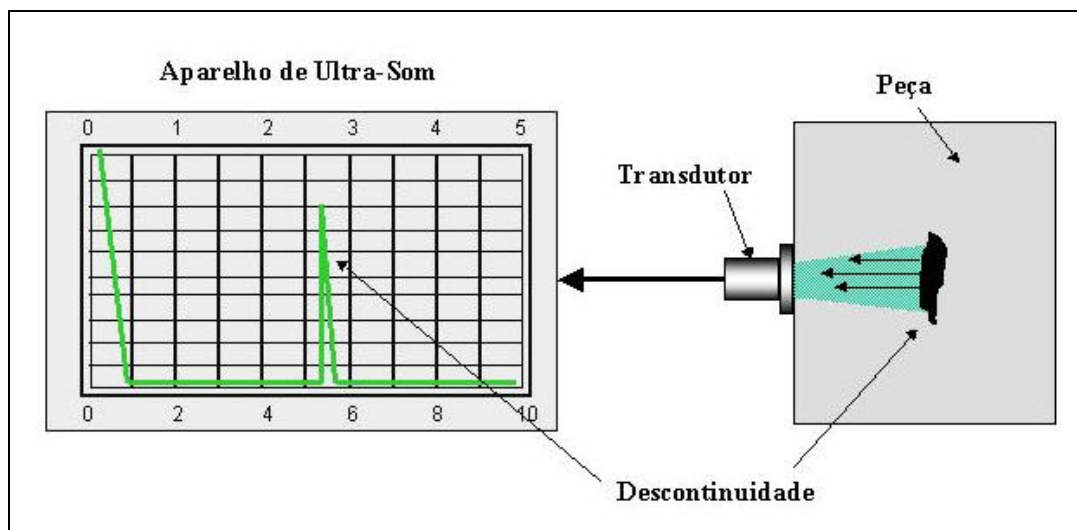


Figura 2.6 Princípio básico da inspeção por US. [Andreucci, 2008]

Um dos fatores mais importantes na inspeção por US é a escolha correta do cabeçote. Cabeçotes com frequências menores, até 5 MHz, são mais utilizados para a inspeção de materiais laminados e forjados. A inspeção com frequências maiores não seria prática porque há interferência da microestrutura do aço na inspeção. Para o caso de peças forjadas, podem ser aplicadas frequências de até 1 MHz devido a estrutura grosseira que em geral estas apresentam.

Cabeçotes com frequências acima de 5 MHz são utilizados para detectar descontinuidades pequenas, geralmente em pequenas peças. Na maioria das vezes o material a ser inspecionado com esta frequência necessita de tratamentos térmicos específicos para cada tipo de material.

O cabeçote pode ser de dois tipos (i) monocristal: possui apenas um cristal que simultaneamente funciona como emissor e receptor do feixe sônico; por apresentar uma zona morta muito grande, é mais comumente utilizado para varredura de maiores espessuras (ii) duplo-cristal: possui um cristal para emissão do feixe sônico e outro para sua recepção; é mais utilizado para detecção de descontinuidades logo abaixo da superfície e também para a medição de espessura.

As características do feixe sônico para a análise com US seguem as seguintes definições (Apostila, 2001):

A Divergência é a abertura do feixe sônico, responsável por parte da perda de intensidade da onda sônica, conforme mostra a Equação 2.1.

$$\text{sen} \frac{\phi}{2} = K * \frac{V}{F * D \text{ cristal}} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

ϕ = Divergência do feixe

K = Varia em função da redução da intensidade sônica com a abertura do feixe sônico;

V = Velocidade do som (m/s);

F = Frequência do transdutor (MHz);

D cristal = Diâmetro do cristal (m);

O campo próximo é uma região de grande interferência ondulatória, onde há dificuldade de detecção de descontinuidades menores que o diâmetro do transdutor, apresentado na Equação 2.2.

$$N = \frac{Def^2}{4 * \lambda} \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

N = Campo próximo (mm);

Def = Diâmetro Efetivo do cristal (mm);

λ = Comprimento de onda (mm);

A atenuação dentre outras causas ocorre devido a perdas de energia por dissipação, espalhamento do feixe (reflexões), divergências...

A zona morta, característica de transdutores monocristais, é uma região sem inspeção devido à vibração finita do cristal que não consegue atuar ao mesmo tempo como emissor e receptor.

O campo longínquo é a região adjacente ao campo próximo, onde a amplitude dos sinais provenientes das descontinuidades é proporcional ao seu tamanho. A região ideal para a detecção das descontinuidades se situa entre o campo próximo e o campo longínquo.

2.3.1 Ensaio com ultrassom manual

O ensaio por US manual é bastante utilizado devido à praticidade e à mobilidade do equipamento. Além disso, esta técnica permite a definição do tipo de descontinuidade interna no material sem a necessidade de retirada de amostras para análise em laboratório, garantindo uma boa confiabilidade. Entretanto, a correta caracterização da descontinuidade depende de um elevado grau de capacitação do avaliador. A Figura 2.7 apresenta a curva de referência para a avaliação de uma descontinuidade encontrada em determinado material, levando em consideração o eco de fundo.

A curva DGS (*Distance, Gain, Size*), ou Tamanho, Ganho, Distância, Figura 2.8, é utilizada como uma referência de descontinuidade equivalente com a função de gerar uma comparação de uma descontinuidade real no material com um defeito artificial conhecido, já que a curva é traçada com um defeito do tipo Furo de Fundo Plano. Para cada cabeçote existe um conjunto de curvas e cada curva representa o tamanho do refletor artificial.

O método de avaliação do material será a incidência de descontinuidades acima da curva pré-estabelecida, a partir da suposição que as descontinuidades que estão na curva são equivalentes ao refletor de referência.



Figura 2.7 Curva de referência na análise com transdutor normal. [Apostila, 2001]

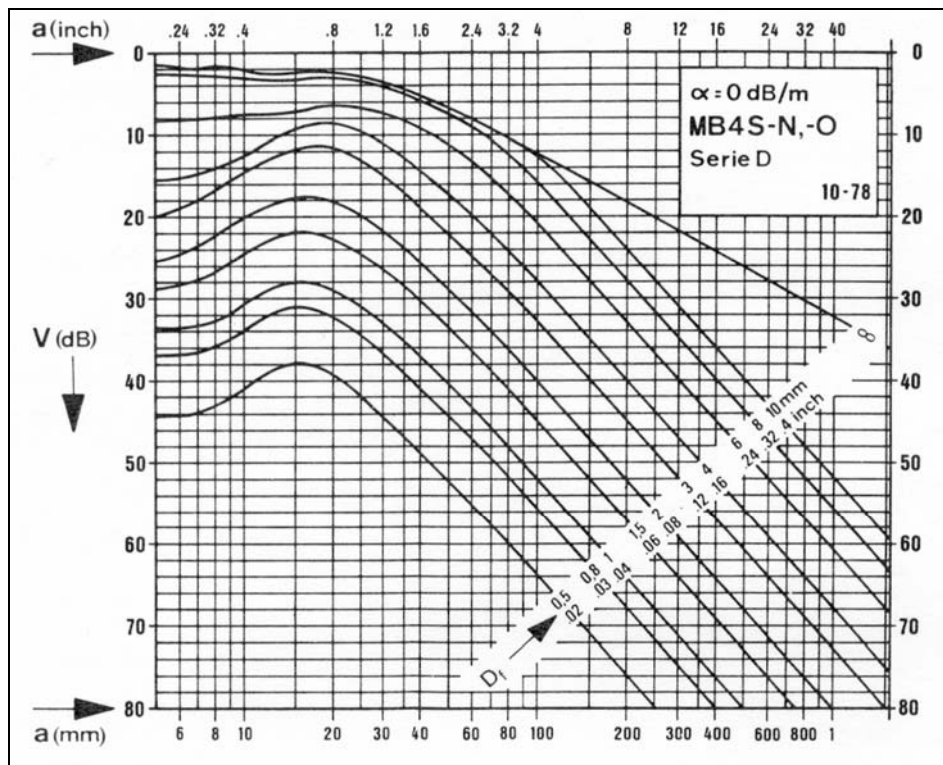


Figura 2.8 Exemplo de curva DGS para um transdutor de 4 MHz miniatura. [Apostila, 2001]

O Bell abreviado por B é uma grandeza que define o nível de intensidade sonora (NIS) e que compara duas intensidades quaisquer, como segue na Equação 2.3:

$$N.I.S. = \text{Log} \frac{I}{I_0} [B] \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde:

I e I_0 são duas intensidades sonoras medidas em Watt por centímetro quadrado (W/cm^2).

Por outro lado, o decibel equivale a 1/10 do Bell e em geral é utilizado para medidas de N.I.S., segundo a Equação 2.4:

$$N.I.S. = 10 \text{Log} \frac{I}{I_0} [dB] \quad \text{Equação 2.4}$$

Entretanto, a teoria dos movimentos harmônicos na propagação ondulatória ensina que a intensidade de vibração é proporcional ao quadrado da amplitude sonora e, portanto deve-se reescrever a Equação 2.4, conforme a Equação 2.5:

$$N.A.S. = 10 \text{Log} \left(\frac{A}{A_0} \right)^2 \quad (\text{Nível de Amplitude Sonora}) \rightarrow N.A.S. = 20 \text{Log} \frac{A}{A_0} \quad \text{Equação 2.5}$$

Esta relação da equação pode ser entendida como sendo a comparação efetuada por um sistema eletrônico de duas amplitudes de sinais, no transdutor ultra-sônico, ou simplesmente conhecida por “ganho”.

2.3.2 Ensaio com ultrassom por imersão

No ensaio de US por imersão, o cabeçote não entra em contato direto com a peça. Ao invés disso, utiliza-se um meio líquido, mais usualmente água, para realizar a transmissão sonora onde o cabeçote e a peça ficam submersos (SANTIN, 1996). Este método apresenta como principal vantagem a adaptabilidade para automatização. Na Figura 2.9 são apresentadas diferentes formas para a inspeção por imersão. Para a avaliação do tipo de descontinuidade existente no material, se faz necessário a utilização de um equipamento de US manual.

Os cabeçotes de imersão são semelhantes aos cabeçotes normais, diferenciando no cuidado com sua proteção, já que está imerso em um meio líquido. Eles geram ondas longitudinais, mas podem ser direcionados conforme o ângulo desejado, podendo, assim, gerar ondas de outros tipos.

Nesta técnica o acoplamento ocorre homogeneamente, já que o transdutor não exerce pressão sobre a superfície do material e este permanece a uma distância fixa e sem contato. Sempre se deve atentar para a coluna d'água devido às diferenças de velocidade, que é quatro vezes menor na água em relação ao aço. Como existe esta coluna d'água, o eco de entrada do som na peça é afastado do eco inicial em um fator de quatro. Com isto, a coluna d'água deve ser calculada para a faixa de bitola inspecionada, para que a segunda reflexão de eco de entrada não seja refletida entre o primeiro eco de entrada e o eco de fundo, gerando confusões na interpretação dos ecos.

O sistema de inspeção é apresentado de forma esquemática na Figura 2.10 e pode ser descrito como: (APOSTILA, 2001).

- Pulso inicial: Ponto zero da escala, que é o pulso inicial do transdutor;
- Eco de entrada (1): Corresponde à primeira reflexão proveniente da superfície do material, denominado eco de entrada do feixe sônico longitudinal no material (interface água e aço). O US automático possui uma função, onde é possível suprimir este Eco de entrada;

- Eco do defeito (2): Após o feixe sônico penetrar no material e encontrar determinada descontinuidade é produzido um segundo eco, que determina a localização e tamanho desta;
- Eco de fundo (3): Quando o feixe sônico atravessa todo o material e encontra a superfície oposta, se refletindo e retornando ao transdutor;
- Segundo eco de entrada (4): Deve ser o último sinal a aparecer na tela do equipamento (interface água, aço), após o eco de fundo.

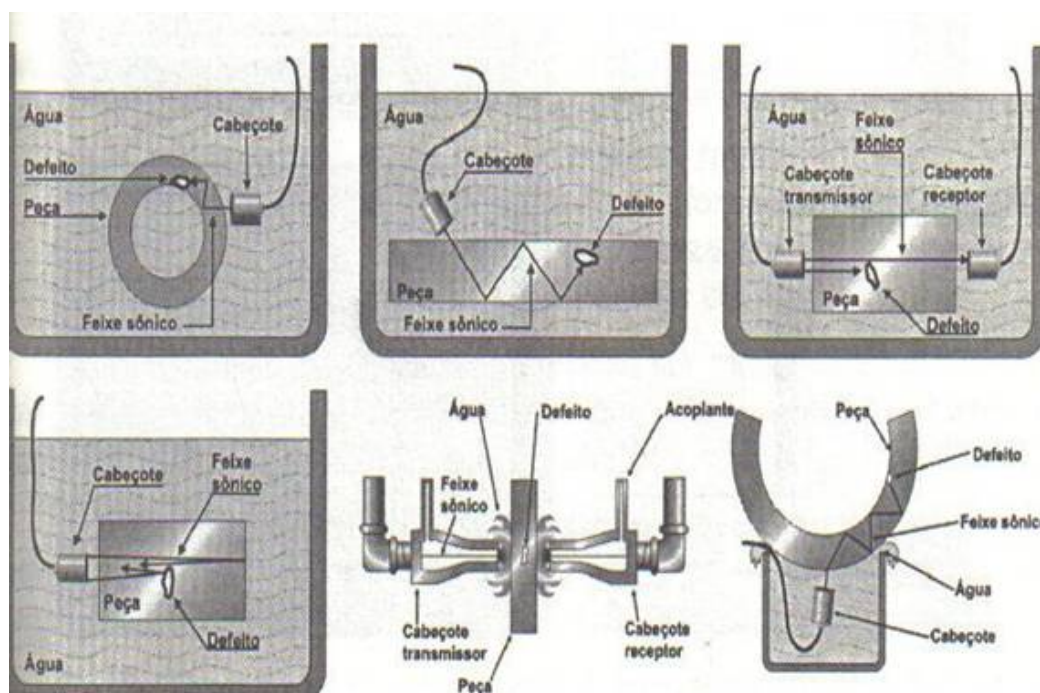


Figura 2.9 Variações do teste por imersão. [Santin, 1996]

Nos sistemas automáticos e semi-automáticos, a coluna d'água é bastante fina e avaliada em função da escala; esta coluna servirá somente para garantir o acoplamento, Figura 2.11. Por exemplo, utilizando uma escala de 100 mm na tela, o eco de entrada será representado na marca de 40 mm, pois a velocidade de propagação na água é quatro vezes menor do que no aço.

O tipo de transdutor mais usualmente utilizado é o transdutor normal, podendo ser ajustado no equipamento com determinada inclinação em relação à superfície da peça, originando assim, uma onda transversal no interior da peça. Nestes casos não haverá eco de fundo.

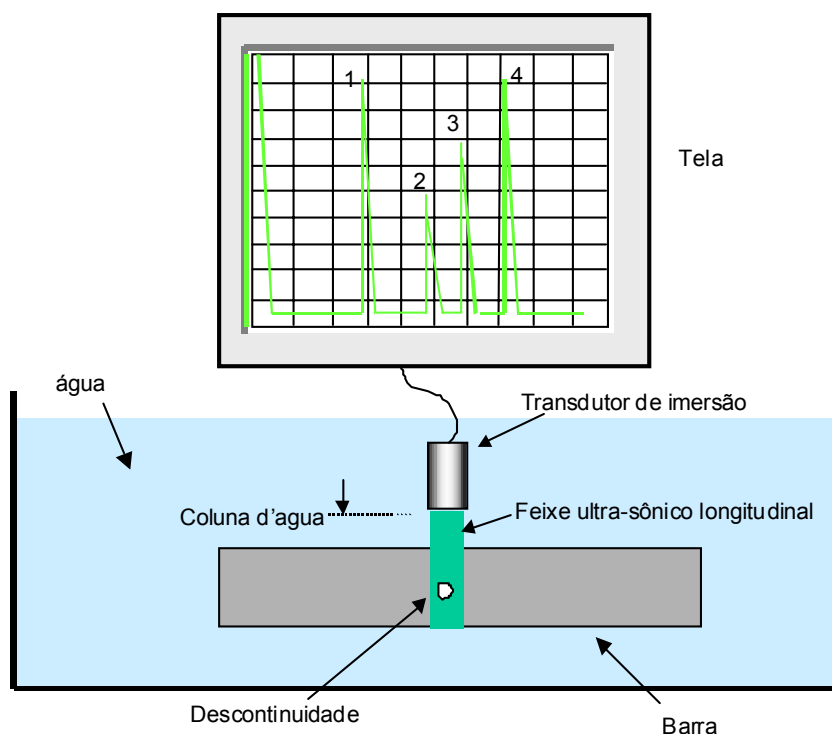


Figura 2.10 Sistema típico de inspeção por imersão com feixe normal à superfície.
[Apostila, 2001]

Em relação à detecção de descontinuidades, o tamanho máximo será de aproximadamente 1,5 vezes o comprimento efetivo do cristal; ou seja, um cristal de 12 mm de diâmetro será capaz de detectar uma descontinuidade de até 18 mm, pela relação de abertura do feixe sônico.

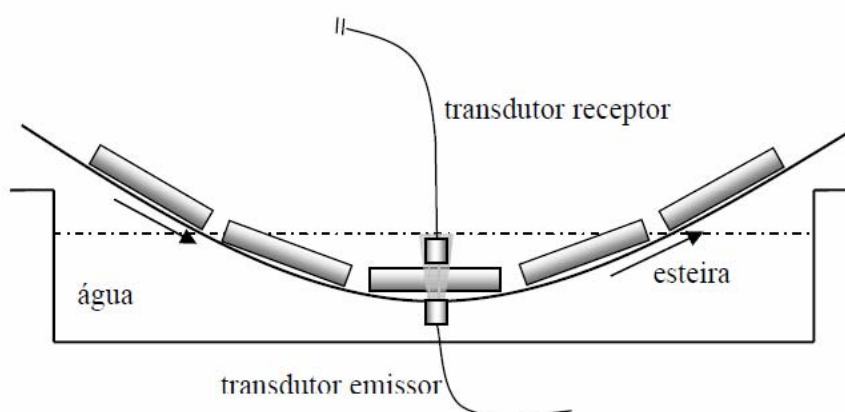


Figura 2.11 Ensaio de US por imersão. A água atua como acoplante, transmitindo a onda sonora até a peça. [Nepomuceno, 1980]

2.3.2.1 Parâmetros variáveis do equipamento

Existem algumas variáveis que mais contribuem na avaliação das descontinuidades devendo ser ajustadas para realizar, com confiabilidade, a inspeção com o equipamento de US automático, com objetivo de permitir a detecção das descontinuidades e minimizar a ocorrência de indicações falsas, ou ecos fantasma, conforme segue (SANTIN, 2003):

A primeira variável a ser controlada está diretamente ligada às **indicações falsas**, as quais são geralmente ocasionadas por pulsos de ruído de rádio frequência, que ocorrem devido a interferências na onda sônica transmitida, quando próximas a contatos eletromagnéticos, contadores, alta taxa de repetição de pulso (TRP) dentre outros. O equipamento de US possui um filtro de ruído que suprime ou zera a amplitude do sinal do ruído, podendo ser ajustado de acordo com a necessidade.

A **Taxa de Repetição de Pulso (TRP)** indica a quantidade de pulsos emitidos em um período de tempo, já que o mesmo cabeçote emite e recebe os pulsos. Neste caso, um novo pulso não será emitido enquanto o primeiro não tiver retornado, evitando a ocorrência de defeitos falsos. A Equação 2.6 mostra o cálculo relacionado à TRP.

$$d = \frac{V}{TRP} \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde:

d – Distância entre pulsos (m)

V – Velocidade do som (m/s)

TRP – Taxa de repetição de pulso (pulso/s = 1/s)

Já que a distância corresponde ao caminho de ida e volta do som, para se determinar a espessura máxima a ser inspecionada com uma determinada TRP, deve-se considerar somente $d/2$. Ao final, aplica-se uma TRP de 5 a 20%, dependendo do tipo de material, acabamento e estrutura, evitando a supervalorização das descontinuidades.

Outro modo de calcular a TRP é considerando o comprimento de onda como o diâmetro do menor refletor detectável. A velocidade máxima de ensaio ($V_{\text{máx}}$) depende de:

- taxa de repetição de pulso (TRP);
- filtro de ruído (R);

- espessura da coluna d'água (CD);
- espessura da peça (e);
- diâmetro efetivo do feixe (df) – será adotado o diâmetro do cristal;
- diâmetro do menor refletor a ser detectado (dr).

Então, a distância em tempo (t) entre dois pulsos consecutivos é determinada pela TRP, conforme Equação 2.7:

$$t = \frac{1}{TRP} \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde:

t = distância em tempo (s)

TRP = taxa de repetição de pulso (pulso/s = 1/s)

A uma velocidade constante de ensaio (v), o cabeçote desloca-se (d) de acordo com a Equação 2.8:

$$d_0 = v \times t \quad \text{Equação 2.8}$$

Onde:

d₀ = menor refletor a ser detectado (m)

v = velocidade máxima do ensaio (m/s)

A **Rotação e a Varredura 100%** ocorrem de modo que os transdutores se movimentem em torno do material, com velocidade de giro variável, enquanto o material passa pelo equipamento com velocidade constante. A rotação será mais efetiva quanto maior a área superficial varrida, tal que pequenas discontinuidades sejam detectadas por pelo menos um dos transdutores. A varredura é calculada considerando-se o tamanho efetivo do cabeçote (parte ativa) e a circunferência inspecionada, de acordo com a Equação 2.9.

$$\text{Varredura} = \frac{TC}{CI} \quad \text{Equação 2.9}$$

Onde:

TC - Tamanho do cabeçote (mm)

CI - Circunferência Inspeccionada (mm)

A **Curva DAC** (ou CAT – correção altura distância) é utilizada para facilitar a avaliação das descontinuidades em diferentes profundidades do material em teste, ou seja, corrige a amplitude de um refletor conhecido. Para equipamentos de inspeção automática, esta correção de amplitude de descontinuidade natural com relação ao defeito artificial se dá de forma eletrônica. Na Figura 2.12 pode ser observado um exemplo de curva DAC utilizada no equipamento de inspeção automático.

Conforme Santim (2003), para traçar a curva, deve-se utilizar a Equação 2.10. Quando duplicada a bitola inspeccionada tem-se uma perda de sinal aproximada de 9 dB's.

$$A = 30 \log \frac{d_2}{d_1} \quad \text{Equação 2.10}$$

Onde:

A = Amplitude

d_2 = Diâmetro maior

d_1 = Diâmetro menor

Quando um eco de descontinuidade aparece, uma avaliação imediata pode ser realizada, através da curva DAC, independente se ela exceda ou não a curva. As vantagens do bloco de referência e da curva DAC são (BERKE, 2000):

- Não é necessário comparar cada eco de descontinuidade com o eco do bloco de referência, mas realizar uma avaliação direta com a DAC.
- O bloco de referência não necessita ser deslocado sempre que um ensaio for reproduzido.
- A criação da DAC geralmente só será desenvolvida uma vez, pois estará localizada ou na memória do software ou plotada em uma transparência.

A **coluna d'água**, que corresponde ao preenchimento entre a peça e o cabeçote deve ser ajustada conforme a espessura do material a ser inspeccionado, de acordo com a Equação

2.11. Para o cálculo são considerados os fatores velocidade dos meios, espessura da peça, além de um fator de segurança.

$$CD = \frac{V_{\text{água}}}{V_{\text{material}}} \times (E + 0,006) \quad \text{Equação 2.11}$$

Onde:

CD – Coluna d'água

V_{material} – Velocidade do som no material (m/s)

$V_{\text{água}}$ – Velocidade do som na água (m/s)

E – Espessura da peça (m)

A **velocidade de ensaio** é um dos parâmetros mais importantes na inspeção automática e é inversamente proporcional à detecção de descontinuidades, ou seja, quanto menor a velocidade, maior é a capacidade de detecção do equipamento.

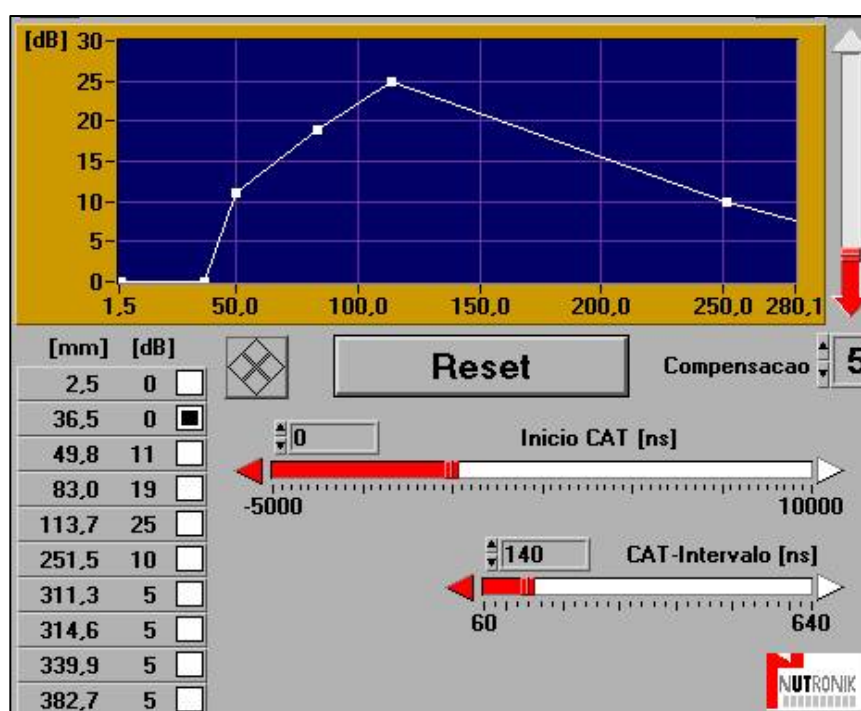


Figura 2.12 Exemplo de curva DAC. [Elaborado pela autora]

2.3.2.2 Parâmetros fixos do equipamento

As **buchas do US** são utilizadas para guiar a barra no equipamento automático em linha, bem como para gerar um acoplamento entre o material e o equipamento de teste, com o objetivo de formar a coluna de água.

O equipamento necessita de duas buchas na entrada e duas na saída, visando um bom acoplamento e evitando oscilação devido à vibração do mesmo, que pode prejudicar o ensaio através de indicações falsas.

Os **filtros de limpeza de água** são utilizados para garantir uma vazão de água adequada para um bom acoplamento entre a barra a ser inspecionada e o cabeçote de inspeção do equipamento automático, filtrando as impurezas existentes que poderiam causar interferências na inspeção.

2.3.3 Ajuste dos equipamentos manual e automático

É fundamental que o equipamento de US seja ajustado antes de se realizar qualquer avaliação de descontinuidades internas, pois somente se pode julgar sua criticidade comparando-a com um refletor de dimensões conhecidas.

As técnicas mais utilizadas para o ajuste da sensibilidade dos equipamentos de US, visando a avaliação de descontinuidades são (i) Técnica do furo de fundo plano, mais aconselhável para utilização em US manual com cabeçote normal e angular e (ii) Técnica do furo transversal, mais aconselhável para utilização em US automático e US manual com cabeçote angular, principalmente dedicada à inspeção de soldas (SANTIN, 2003).

O bloco V1, Figura 2.13, é utilizado para o ajuste do US manual, tanto para cabeçotes angulares quanto normais. As dimensões e o percurso sônico são conhecidos de acordo com a norma DIN 54120. Este padrão de ajuste é utilizado para (i) ajustar a escala de inspeção, conforme a bitola do material inspecionado, (ii) verificar a sensibilidade do cabeçote (resoluções próxima e distante), (iii) verificar ângulo real do cabeçote e ponto de saída do feixe sônico (específico para cabeçotes angulares).

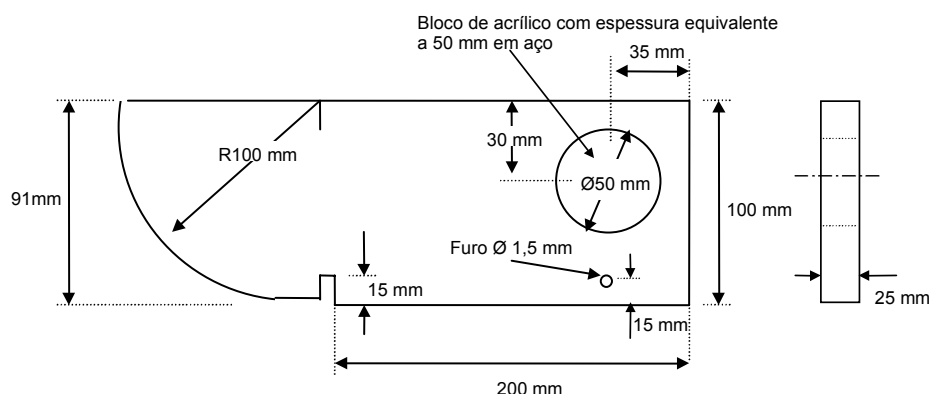


Figura 2.13 Medidas do bloco V1 norma DIN 54120. [APOSTILA, 2001]

O bloco V2, Figura 2.14, é utilizado para o ajuste do US manual, específico para cabeçotes angulares. Este padrão de ajuste é utilizado para (i) ajustar a escala de inspeção, conforme a bitola do material inspecionado, (ii) verificar a sensibilidade do cabeçote, (iii) verificar ângulo real do cabeçote e ponto de saída do feixe sônico. Para este ajuste, na tela do US é visualizado um percurso de 75 mm com relação ao primeiro eco, devido ao percurso sônico do bloco V2, conforme norma DIN 54122.

A técnica de furo de fundo plano é baseada na comparação de uma descontinuidade interna do material com o fundo plano de um furo artificial longitudinal em relação ao eixo acústico do feixe sônico, que se assemelha a uma descontinuidade em forma de disco. Quando é dobrado o diâmetro do furo, a área refletiva é quadruplicada, gerando uma variação de 12 dB's.

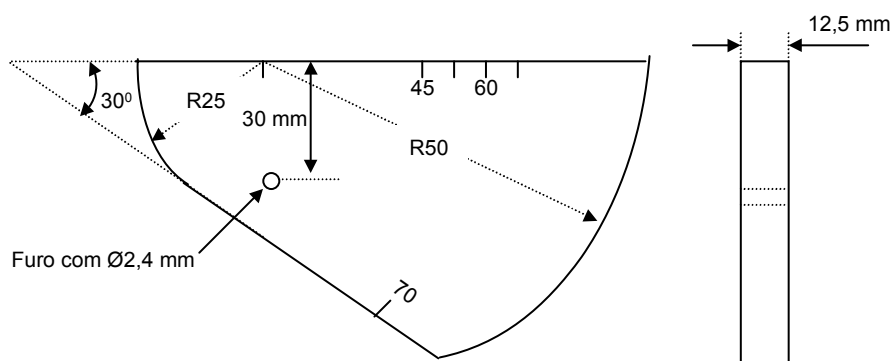


Figura 2.14 Medidas do bloco V2 norma DIN 54122. [APOSTILA, 2001]

O bloco FBH (*Flat Bottom Hole*), ou Furo de Fundo Plano, Figura 2.15 é utilizado para a criação de curvas de referência de inspeção no US manual. Com menos frequência, são

utilizados como referência para o ajuste do US automático, que neste caso não são blocos, mas sim barras contendo FBH na sua superfície. Deve conter um defeito artificial em cada bloco, ou vários defeitos no mesmo bloco do tipo furo de fundo plano, com diferentes profundidades em relação à superfície que se está avaliando. É utilizado para fornecer diferentes amplitudes de sinais de defeitos, devido a esta distância percorrida pelo feixe sônico.

A primeira referência utilizada para o ajuste das curvas é o eco de fundo isento de oscilações, que é maximizado até um patamar conhecido, usualmente a 80%, verificando o ganho necessário para colocá-lo esta amplitude. Na seqüência, é escolhido o defeito de maior amplitude, ou seja, o mais próximo da superfície e elevado a 80%, também verificando o ganho. Os demais defeitos são detectados e deve ser encontrada a máxima amplitude. Os pontos encontrados são plotados em um gráfico que é utilizado como referência para a inspeção.

A técnica do furo transversal consiste na comparação de uma descontinuidade interna com um furo paralelo à superfície do material e perpendicular ao feixe sônico (MIX, 2005). O furo transversal é um refletor misto, ou seja, na direção paralela ele ultrapassa os limites do feixe sônico e, na direção perpendicular, ele está localizado dentro do feixe sônico em sua totalidade.

O bloco SDH (*Side Drilled Hole*), ou Furo Transversal, Figura 2.16 é utilizado para a criação de curvas de referência de inspeção no US manual, geralmente para cabeçotes angulares e como referência de ajuste para o US automático, mais comumente utilizado para este último caso, já que apresenta maior praticidade de detecção em relação ao FBH. Contém um defeito artificial no centro da barra do tipo furo transversal. É utilizado para fornecer o sinal de um defeito conhecido, pois suas dimensões são mapeadas com US manual e comparadas com um furo de fundo plano, através do diagrama DGS, utilizando o resultado da Equação 2.12 do módulo de treinamento Ultrasonic Testing Level II (1998).

$$D(FBH) = \sqrt{\{0,45 * \lambda * \sqrt{[D(SDH) * s]}\}} \quad \text{Equação 2.12}$$

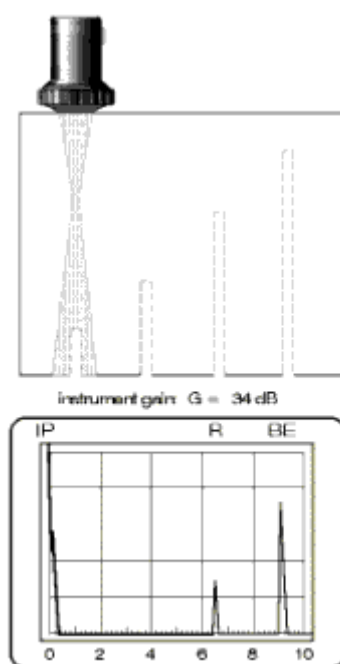


Figura 2.15 Bloco de ajuste FBH.[Berke, 2000]

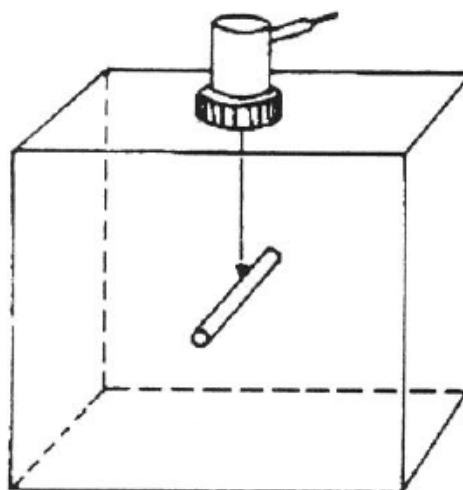


Figura 2.16 Bloco de ajuste SDH. [ULTRASONIC TESTING LEVEL II, 1998]

3.0 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O projeto iniciou com a análise do determinado tipo de descontinuidade encontrada em inspeção por US manual, ainda que com certa dificuldade, mas de difícil detecção nas linhas de inspeção. Através de análise por microscopia eletrônica de varredura foi caracterizada como inclusão tipo sulfeto de manganês.

Pela análise da Figura 3.1 é possível visualizar a dificuldade na detecção de descontinuidades que fogem à morfologia da utilizada no ajuste do equipamento de US automático. A descontinuidade utilizada no ajuste é do tipo furo transversal, já a inclusão tipo sulfeto de manganês possui certa inclinação e desalinhamento na estrutura.

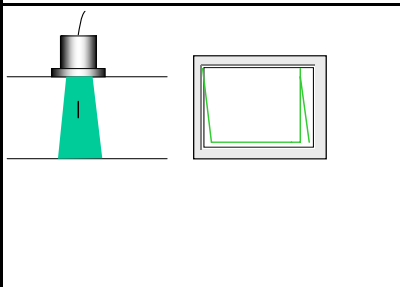
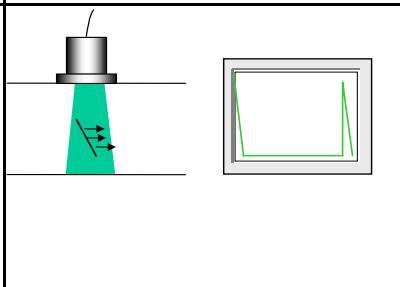
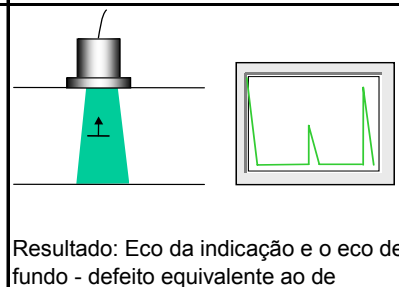
Descontinuidade linear, na posição vertical em relação ao feixe sônico.	Descontinuidade linear, pequena, na posição inclinada em relação ao feixe sônico.	Descontinuidade linear, pequena, na posição perpendicular em relação ao feixe sônico.
		
Resultado: Somente eco de fundo	Resultado: Somente o eco de fundo	Resultado: Eco da indicação e o eco de fundo - defeito equivalente ao de calibração do equipamento

Figura 3.1 Diferenças nos sinais de descontinuidades. [Apostila, 2001]

Por se tratar de um trabalho dedicado à detecção das descontinuidades, não será estudada a formação nem os meios de contenção. Além disso, a proveniência do problema no produto final durante o forjamento a quente das peças não será abordada.

Cabe salientar que os parâmetros atuais e o ajuste do equipamento têm um foco de detecção de defeitos tipo trincas internas. Por isso, a liberação do produto pelo critério de amostragem consistia em:

- Pontos onde o US automático detectou a descontinuidade, ou seja, na marcação da Linha;

- Pontos não detectados automaticamente (fora da marcação), avaliados por US manual.

A partir destas análises foi definido que o trabalho seria dividido em duas partes (i) avaliar a solução do problema da formação da descontinuidade e os meios para contê-la nas etapas posteriores à Aciaria, proposta de um novo projeto e (ii) garantir a detecção das inclusões tipo sulfeto de manganês no US automático das Linhas de Inspeção, listando as variáveis para um projeto de experimentos.

O planejamento do projeto experimental iniciou-se com um *brainstorming* com a equipe de operação. Após, aplicou-se a técnica dos porquês para descobrir as causas de anomalias do processo, cujas idéias resultantes foram organizadas em um Diagrama de *Ishikawa*, também conhecido como Diagrama de Causa e Efeito, ou Espinha de Peixe, para correlacionar o problema final às causas (AGUIAR, 2006), Figura 3.2.

O método Diagrama Causa e Efeito permite estruturar hierarquicamente as causas de determinado problema, através do conceito denominado 6M, que lista falhas em: (i) materiais, (ii) métodos, (iii) mão-de-obra, (iv) máquinas, (v) meio ambiente, (vi) medidas. O uso do 6M auxilia na identificação das causas do problema e é um alicerce para o raciocínio da estrutura inicial do trabalho.

As causas mais críticas listadas no Diagrama de *Ishikawa* foram avaliadas através da Matriz de Priorização e Consenso GUT (Gravidade Urgência Tendência), juntamente ao pessoal de processo envolvido, visualizada na Tabela 3.1. A sigla GUT significa:

- Gravidade: Qual o nível da gravidade do problema? Está causando muito prejuízo, acidentes, falta de motivação?
- Urgência: Qual o nível da urgência da solução em se resolver isto? Há muita pressa ou pode-se aguardar?
- Tendência: Qual a tendência de piorar se nada for feito agora?

A pontuação de cada problema, ou oportunidade de melhoria é realizada através do critério de 1, 3, ou 9, respectivamente baixa, média, ou alta gravidade, urgência, ou tendência.

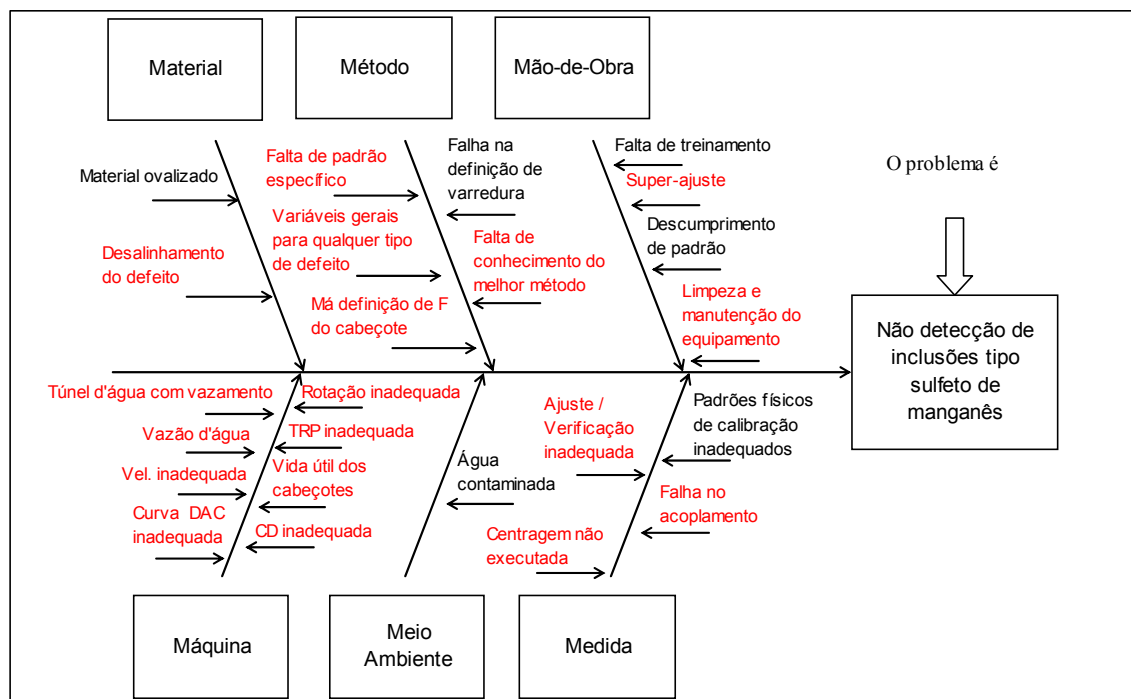


Figura 3.2 Diagrama de Ishikawa. [Elaborado pela autora]

Através da análise da Matriz de Priorização e Consenso, as causas elegidas como prioritárias para a elaboração de um plano de ação, que serão abordadas ao longo deste trabalho foram as seguintes:

- Falta de padrão específico;
- Falta de conhecimento do melhor método;
- Super-ajuste ou super-controle;
- Limpeza e manutenção do equipamento;
- Rotação inadequada;
- Ajuste / verificação inadequada;
- TRP (Taxa de Repetição de Pulso) inadequada;
- Curva DAC inadequada.

Tabela 3.1 Matriz GUT (Gravidade Urgência Tendência). [Elaborado pela autora]

MATRIZ DE PRIORIZAÇÃO E CONSENSO (GUT)										
PROBLEMAS OU OPORTUNIDADES DE MELHORIA	GRAVIDADE			URGÊNCIA			TENDÊNCIA			TOTAL
	Alta	Média	Baixa	Alta	Média	Baixa	Alta	Média	Baixa	
	9	3	1	9	3	1	9	3	1	
Desalinhamento do defeito	9				3				1	27
Falta de padrão específico	9			9					1	81
Variáveis gerais para qualquer tipo de defeito		3			3				1	9
Falta de conhecimento do melhor método	9			9				3		243
Super-controle	9			9				3		243
Limpeza e manutenção do equipamento		3			3		9			81
Túnel d'água com vazamento			1			1			1	1
Vazão d'água		3			3			3		27
Rotação inadequada	9			9					1	81
Vida útil dos cabeçotes			1			1	9			9
Centragem não executada										
Ajuste / verificação inadequada	9			9				3		243
TRP inadequada	9			9					1	81
Má definição de F do cabeçote		3				1			1	3
Velocidade inadequada		3				1			1	3
Curva DAC inadequada	9			9					1	81
CD inadequada		3				1			1	3
Falha no acoplamento		3			3			3		27

4.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Material

O tipo de material utilizado nos testes é o aço 15V45, aço microligado ao V, de bitola 104 mm, utilizado em processos por forjamento a quente para a produção de bielas, cuja composição química está descrita nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 Composição química do aço 15V45.

%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al
Mínimo	0,43	0,06	1,35	-	0,06	0,22	-	-	0,20	-
Máximo	0,47	0,70	1,50	0,03	0,09	0,28	0,25	0,06	0,23	0,015

Tabela 4.2 Elementos residuais do aço 15V45.

%	N	Cu	H
Mínimo	0,015	-	-
Máximo	0,025	0,250	2,00

4.2 Caracterização das descontinuidades

As descontinuidades existentes no material foram mapeadas utilizando o US manual, a localização destas foi identificada e foram cortadas amostras para a realização de análises laboratoriais. As análises foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) conforme exemplo apresentado na Figura 4.1, onde foi identificado o tipo de descontinuidade como inclusões de MnS.

Os sulfetos identificados apresentam determinado alinhamento em sua morfologia, podendo também apresentar uma forma ramificada. São classificados como sulfetos do Tipo II, em sua maioria, eutéticos irregulares. Como este tipo de sulfeto é um dos mais críticos, existe dificuldade na sua identificação em equipamentos de US, tanto automático quanto manual, por suas características como espessura, descontinuidade no alinhamento e tamanho.

Foi identificado que este tipo de descontinuidade interna pode gerar problemas após o forjamento a quente devido à possibilidade de abertura e propagação, gerando defeito no produto final.

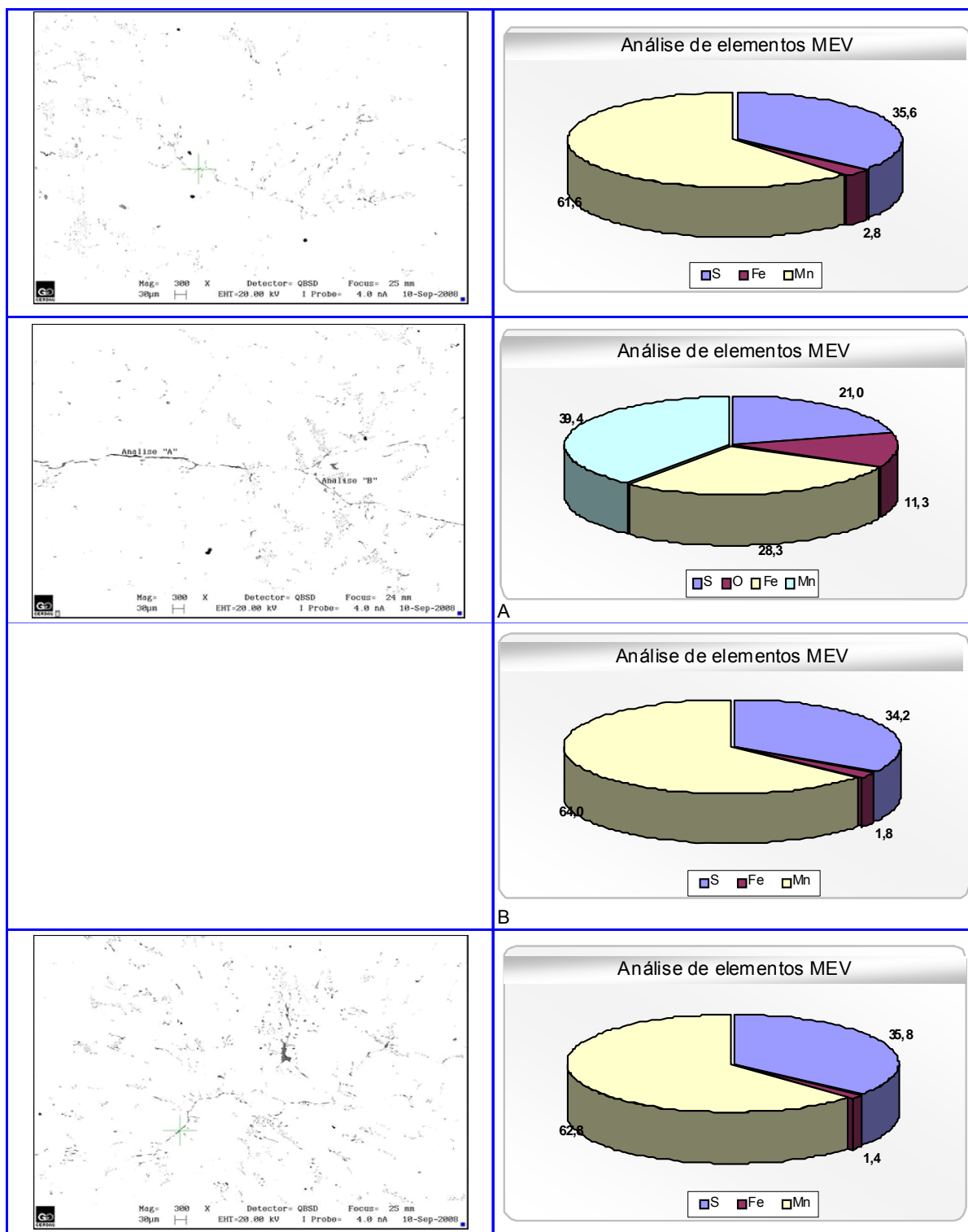


Figura 4.1 Análise dos elementos existentes nas descontinuidades do tipo sulfeto.
[Elaborado pela autora]

4.3 Defeitos artificiais

Para o ajuste do equipamento foi utilizado o defeito da barra padrão de ajuste do US automático. Nesta barra existem dois defeitos artificiais do tipo SDH, desenvolvidos pelo método de eletro-erosão. O primeiro localizado sub-superficialmente com 1 mm de diâmetro por 50 mm de comprimento, o segundo localizado no núcleo da barra, com as mesmas medidas, ambos aproximadamente no centro do comprimento da barra, conforme apresentado na Figura 4.2.

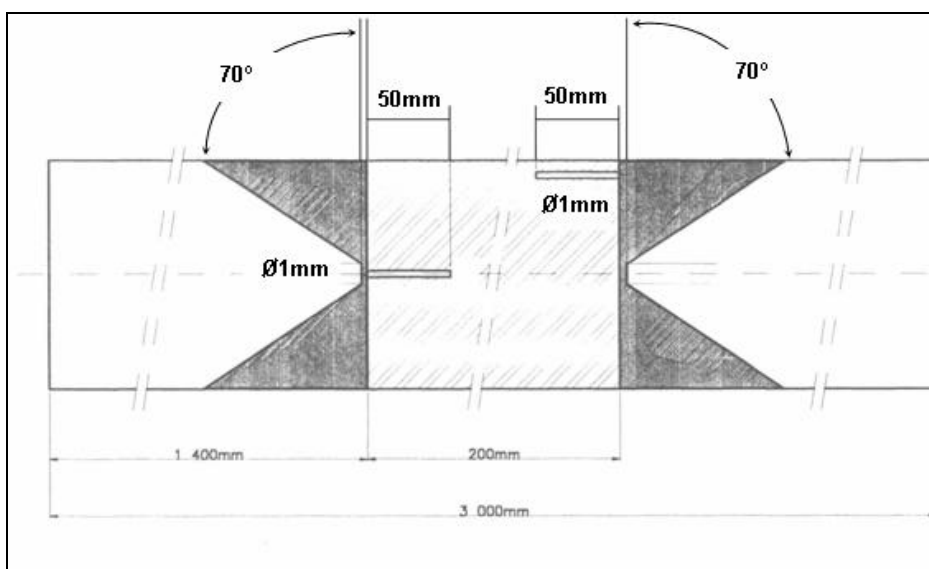


Figura 4.2 Barra padrão de ajuste do US automático. [Apostila, 2001]

O certificado desta barra padrão foi elaborado através da avaliação por US manual, a partir da identificação de sua posição e avaliação da amplitude do sinal através do método AVG, ou DGS.

4.4 Descontinuidades reais

As descontinuidades utilizadas como padrão para a elaboração dos testes foram as próprias inclusões do material que foi processado. Foi separada uma barra para ser utilizada como padrão, mapeada por US manual e identificadas as descontinuidades, sua posição em relação ao comprimento da barra, bem como suas amplitudes, para ser definida a importância, conforme visualizado na Figura 4.3.

Esta barra específica foi segregada e utilizada como padrão por apresentar uma grande quantidade de inclusões, com diferentes tipos e tamanhos, considerada ideal para testar os formatos das descontinuidades que vinham sendo detectadas nas corridas deste material.

Foi definido que seria melhor trabalhar com descontinuidades reais devido a sua peculiaridade e criticidade para a aplicação determinada. Acredita-se que se o equipamento for capaz de detectar os sulfetos de manganês com elevada confiabilidade e uma pequena quantidade de indicações falsas, o ajuste poderá ser utilizado, com poucas modificações, para a detecção de outros tipos de descontinuidades em materiais distintos.

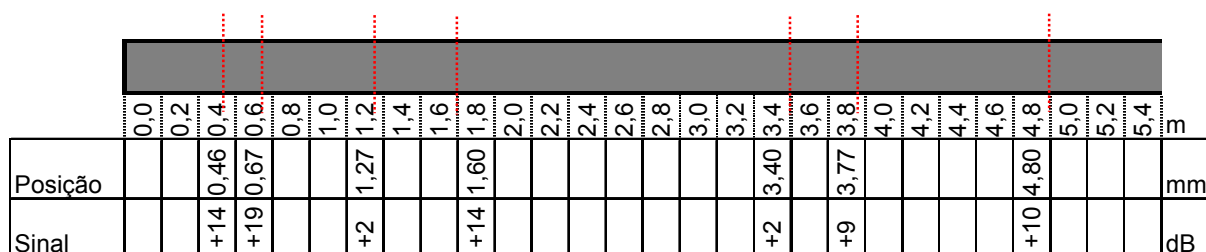


Figura 4.3 Mapeamento da barra padrão com inclusões tipo sulfeto de manganês.
[Elaborado pela Autora]

4.5 Equipamento de inspeção automática

Os parâmetros do equipamento de ultrassom por imersão utilizados nos testes desenvolvidos estão descritos a seguir:

Número de transdutores: 6 transdutores de 5 MHz, cada um com 6 mm de largura, em um mesmo arranjo. Estes transdutores são protegidos por uma carcaça resistente, com a finalidade de evitar a sua deterioração durante o ensaio, devido a sua constante imersão em água industrial, Figura 4.4.

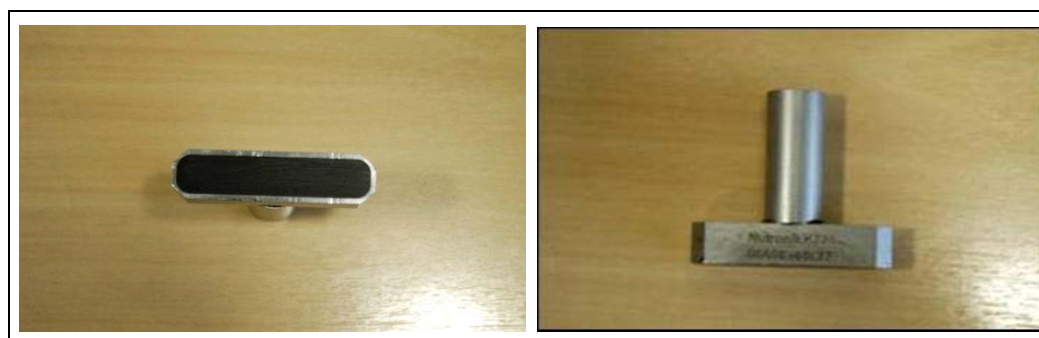


Figura 4.4 Visão geral do transdutor – 6 cristais em um mesmo arranjo utilizado, aproximadamente 50 mm. [Elaborado pela autora]

O ajuste do equipamento é realizado com a barra padrão de ajuste da Figura 4.2. O tamanho da menor descontinuidade detectável é relacionado ao defeito da barra padrão de ajuste, correspondente a 1 mm.

Os parâmetros de inspeção do equipamento de US automático em uma linha de inspeção que possui outros equipamentos de END (Circoflux, Magnatest e US) são:

- Velocidade máxima: 2,0 m/s;
- Ponta não testada: 50 a 80 mm;
- Temperatura máxima de ensaio: 80°C;
- Rotação máxima: 2.000 RPM;
- Tipo de varredura: Helicoidal.

As características do material inspecionado pelo equipamento de US automático utilizado nos testes são:

- O que inspeciona: Material laminado bruto e descascado;
- Aplicação: Material laminado redondo;
- Diâmetro do material: Mínimo 50,80 mm – Máximo 104,78 mm;
- Comprimento do material: Mínimo 3,0 m – Máximo 12,0 m.

A Figura 4.5 representa o US com todos os mecanismos descritos anteriormente, disposto em uma linha de inspeção automática, entre outros equipamentos de END.



Figura 4.5 Ultrassom disposto na linha de inspeção. [Elaborado pela autora]

4.6 Programação dos testes no equipamento de inspeção por US automático

No início dos testes, para haver uma base comparativa, foi elaborado um processo de ajuste do equipamento para este material específico. Este ajuste consistia em primeiramente detectar os defeitos do padrão de ajuste existentes no centro e logo abaixo da superfície, identificados na Figura 4.2. Após, colocar a curva DAC 2 (entre as curvas traçadas e elaboradas teoricamente e através de testes: DAC 1, 2 e 3), elaborada de acordo com testes previamente realizados e, por fim, passar a barra padrão mapeada com descontinuidades reais tipo sulfeto, Figura 4.3, na linha de inspeção aumentando o ganho para detectar todos os defeitos existentes, conforme a necessidade. Este ajuste foi denominado Teste 100.

A partir da resposta do Teste 100 e devido à quantidade de indicações falsas resultantes, foi necessário elaborar um ajuste mais assertivo, contendo todos os fatores necessários para um melhor conhecimento do equipamento. Toda a programação de testes no equipamento de inspeção automático foi baseada na Matriz de Priorização e Consenso (GUT).

O primeiro ponto foi solucionar o problema de limpeza e manutenção do equipamento, colocando as etapas seguintes no sistema de manutenção autônoma da área.

Inicialmente foi realizada a limpeza dos filtros de água do US automático, Figura 4.6, pois as partículas de sujeira prejudicam a inspeção, podendo causar interferência, perda de vazão, falta de acoplamento, queda de sinal e ruído.

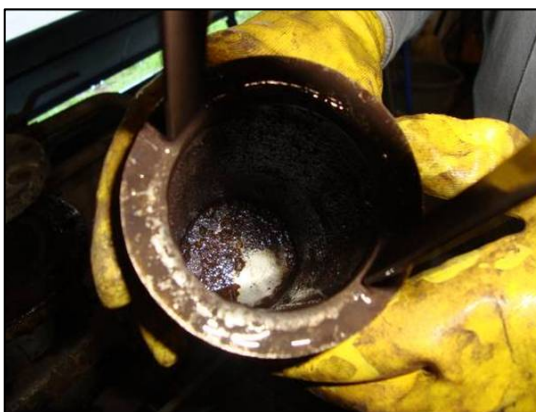


Figura 4.6 Filtros com excesso de sujeira. [Elaborado pela autora]

As buchas que servem para garantir o acoplamento do túnel d'água devem ter uma dimensão ideal para a inspeção. Pela tolerância de bitola, elas devem estar a +2 mm da bitola estipulada, podendo variar +/-0,5mm.

Para a bitola de teste de 104 mm, a bucha deverá estar com 107 mm (+/-0,5mm). As buchas, medidas conforme a Figura 4.7, foram revisadas e trocadas quando estavam fora das dimensões especificadas.



Figura 4.7 Bucha para acoplamento com a correta dimensão. [Elaborado pela autora]

A correta coluna d'água foi calculada e verificada a sua adequação à bitola estudada, objetivando o melhor preenchimento entre peça e cabeçote, de modo que todo o interior da peça fosse devidamente avaliado, sem falhas. A Equação 4.1 evidencia o cálculo e sua adequação ao caso estudado.

$$CD = \frac{1.480 \text{ m/s}}{5.920 \text{ m/s}} \times 0,104 \text{ m} + 0,006 \text{ m} = 0,032 \text{ m} = 32 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.1}$$

O equipamento está ajustado para uma coluna d'água de 31,5 mm, devido a bitola de diâmetro de 104 mm ter uma tolerância de +/- 0,50mm no diâmetro.

Foram definidos o ajuste / verificação mais adequados para a inspeção do material de bitola de 104 mm, em equipamento automático, de acordo com a Matriz GUT. A causa super-controle também será eliminada pela definição do ajuste, proibindo o operador de variá-lo livremente, super-controle é a atitude de tratar qualquer variação do processo como se fossem causas especiais, ajustando-o excessivamente. O procedimento consistiu em detectar o defeito da barra padrão de US automático, seguindo as etapas:

- 1 Colocar o gate de detecção de discontinuidades a 50% da tela;
- 2 Com o equipamento em rotação, localizar o defeito artificial do padrão de ajuste do US e encontrar o eco máximo do defeito em cada uma das 6 sondas, Figura 4.8;

- 3 Colocar eco do defeito em cada transdutor a 50% da tela, buscando seguir o mesmo critério da curva DAC, para facilitar a visualização e garantir uma detecção mínima. Vale ressaltar que foi definido o valor de 50% tanto para não extrapolar a tela do equipamento, como para poder visualizar os sinais quando são detectados defeitos maiores, ajustando o intervalo dinâmico do equipamento;
- 4 Adicionar 6 dBs ao sinal do defeito para atingir 100% da tela, buscando definir um patamar ótimo para a detecção dos defeitos;
 - 4.1 Devido à criticidade da morfologia das inclusões analisadas, com relação à detecção, foi verificado que o ideal é trabalhar com um ganho maior que o ganho necessário para colocar a amplitude do sinal a 50%;
 - 4.2 A definição de acrescentar 6 dBs é para manter a relação de dobrar o sinal;
- 5 Após esta equalização, o equipamento de US Automático deve ser ajustado com o padrão de ajuste no equipamento para definir sua capacidade de detecção do defeito, conforme Figura 4.9. O equipamento deve detectar os defeitos central e sub-superficial identificados anteriormente na Figura 4.2, com mais de 80% da tela;
- 6 Por fim, deve-se passar a barra padrão contendo as discontinuidades reais, mostrada na Figura 4.3, e verificar a detecção de todas as inclusões mapeadas, como forma de garantir a detecção das demais inclusões existentes na corrida;
- 7 O equipamento está apto a inspecionar as barras da corrida.

O objetivo dos testes é detectar a maior quantidade de discontinuidades no material, com o menor nível de ruído e mínima detecção de indicações falsas. As indicações falsas são prejudiciais não somente por levar ao sucateamento das barras erroneamente, ou por gerar uma maior quantidade de retrabalho, mas, principalmente, por diminuir a confiabilidade na avaliação manual, ou seja, quanto mais indicações falsas o operador encontra na avaliação, maior a chance de ser aprovado por ele um material que realmente apresente discontinuidades.

O resultado do ajuste está apresentado na Tabela 4.3 e ilustrado na Figura 4.10, onde se pode comparar o valor de cada um dos 6 transdutores (sondas) entre si, ou seja, verificar a linearidade vertical, estipulando que o equipamento está respondendo bem a um aumento de 6

dBs. Também compara o valor de cada transdutor com o grupo, podendo perceber se houve algum desgaste mais representativo em algum dos transdutores.

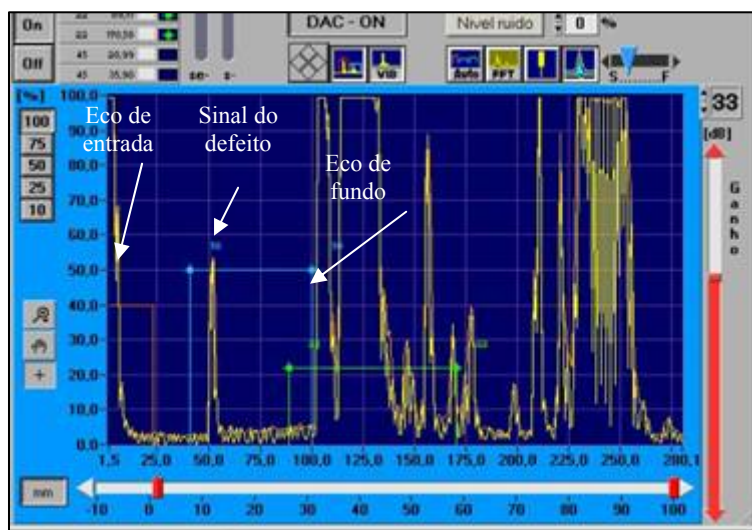


Figura 4.8 Ajuste do sinal de cada transdutor. [Elaborado pela autora]

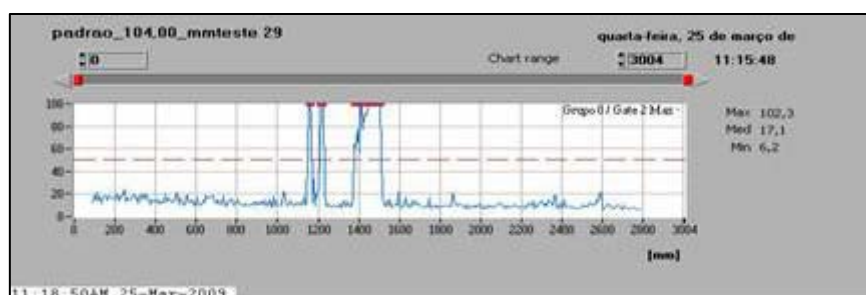


Figura 4.9 Tela de acompanhamento de inspeção do padrão de ajuste. [Elaborado pela autora]

Tabela 4.3 Resultado do ajuste em cada transdutor, avaliado em dB's. [Elaborado pela autora]

Sonda	dB a 50%	dB a 100%
1	23	29
2	33	39
3	29	35
4	29	35
5	29	35
6	27	33

Com o ajuste realizado e os transdutores avaliados, a etapa seguinte foi a definição do DOE (*Design of Experiments*) nesta mesma barra padrão, variando os parâmetros do equipamento, tais como TRP, Rotação e Curva DAC, de acordo com causas identificadas como prioritárias na Matriz GUT: Rotação, TRP e Curva DAC inadequadas, com o objetivo de verificar a amplitude de ruído e descontinuidade na barra padrão.

A definição da rotação mais adequada para a avaliação da peça busca uma varredura igual, ou superior a 100% no material inspecionado, para garantir uma maior confiabilidade. Esta garantia é buscada devido ao equipamento poder deixar de detectar descontinuidades inferiores ao espaçamento entre as sondas, que é de 2 mm.

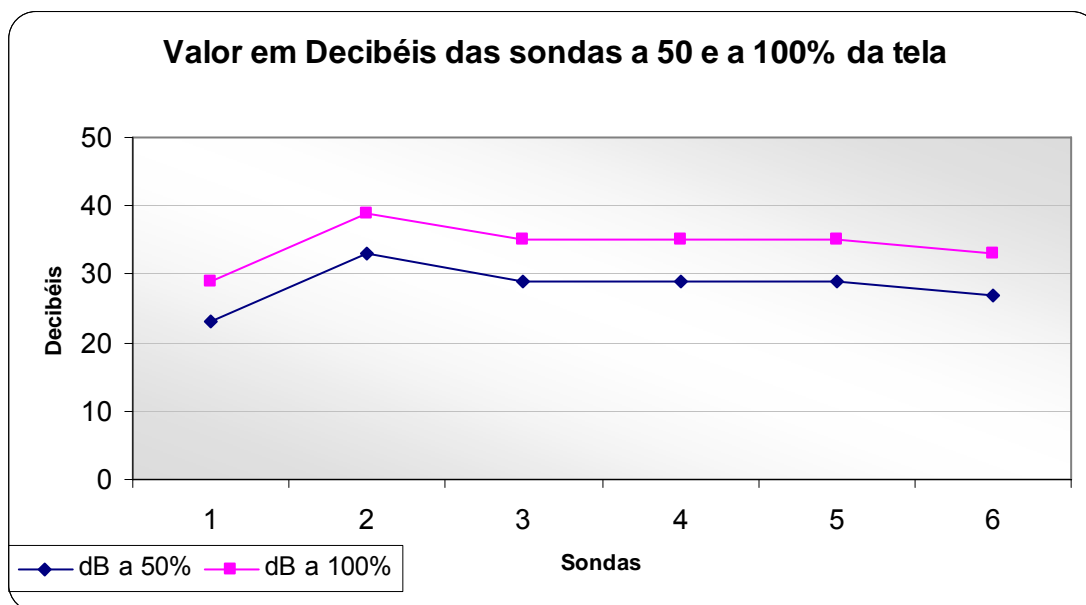


Figura 4.10 Comportamento das transdutores a 50 e 100% da altura da tela do equipamento de US automático. [Elaborado pela autora]

A varredura, considerando uma rotação de 2.000 RPM, está definida nas Equações 4.2 a 4.5. Para o DOE estruturado, também será avaliada uma rotação de 1.500 RPM, que se mostra adequada ao objetivo de varredura maior que 100%.

$$\text{Ciclo/s} = \frac{2000 \text{ RPM}}{60 \text{ s}} = 33,33 \text{ RPS (ciclos/s)} \quad \text{Equação 4.2}$$

$$P = \frac{1}{t} = \frac{1}{33,33 \text{ RPS}} = 0,03 \text{ s} \quad \text{Equação 4.3}$$

$$C = v \times P = 1 \text{ m/s} \times 0,03 \text{ s} = 0,03 \text{ m} = 30 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.4}$$

$$V_s = \frac{\text{Tamanho do Cabeçote}}{C} \times 100\% = \frac{46 \text{ mm}}{30 \text{ mm}} = 153,33\% \quad \text{Equação 4.5}$$

Onde:

Rotação - 2.000 RPM

Tamanho do cabeçote – 46 mm

v - Velocidade de Inspeção

V_s - Varredura

P - Período

t - Ciclos/s

C - Circunferência Inspeccionada

Para a definição da TRP a ser utilizada nos testes deve ser considerado o valor de TRP entre 5 e 20% do valor de $d/2$, conforme Santin (1996). Para o DOE serão utilizados valores mínimos e máximos de TRP, de acordo com as limitações do equipamento (ver Equações 4.6 e 4.7).

$$d = (\text{bitola} \times 2) \times 100 = (104\text{mm} \times 2) \times 100 = 2080\text{mm} = 2,08\text{m} \quad \text{Equação 4.6}$$

$$TRP = \frac{5920}{2,08} = 2846,15 \text{ pulsos / s} \quad \text{Equação 4.7}$$

Também será avaliada nos testes a TRP considerando o comprimento de onda, para um cabeçote de frequência 5 MHz e uma velocidade constante na Linha de Inspeção de 1,0 m/s, conforme segue nas Equações 4.8 a 4.11.

$$\lambda = \frac{V}{F} = \frac{5.920}{5 \times 10^6} = 1,184 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.8}$$

Onde:

λ = Comprimento de onda (mm)

$$d = \frac{0,001184}{2} = 0,592 \text{ mm} \quad \text{Equação 4.9}$$

$$t = \frac{d}{V} = \frac{0,000592}{1} = 0,000592\text{s} \quad \text{Equação 4.10}$$

$$TRP = \frac{1}{t} = \frac{1}{0,000592} = 1.689,18 \text{ pulsos / s} \quad \text{Equação 4.11}$$

Considerando uma média entre 5 e 20%, será utilizado o valor base de 12,5% que resulta em aproximadamente 1500 pulsos/s. No DOE a faixa foi estendida para que fossem testadas a maioria das variações possíveis.

As Curvas DAC utilizadas no DOE serão (i) a curva padrão do equipamento, ou seja, a curva que já estava sendo utilizada para avaliar as demais bitolas inspecionadas, (ii) a curva DAC 2, elaborada no início dos testes, Teste 100 e (iii) curva calculada teoricamente, Figura 4.12. A curva teórica não foi definida como padrão para o equipamento pela necessidade de testar a sua adequação à prática, sendo uma das variáveis do DOE.

Para realizar os cálculos foram arbitradas as bitolas, considerando a menor 20 mm e a maior 110 mm, variando de 10 em 10 mm. Com a obtenção da perda de sinal, pode-se traçar a curva utilizando os intervalos estipulados, conforme Tabela 4.4. Com base nestes dados foi definida a curva de referência para a realização dos testes práticos. A Figura 4.11 apresenta a curva DAC calculada teoricamente.

Tabela 4.4 Cálculo da diferença de amplitude em função da distância. [Elaborado pela autora]

Amplitude (dB)	Distância (mm)
0	20
5,28	30
9,03	40
11,94	50
14,31	60
16,32	70
18,06	80
19,60	90
21,48	104

As etapas do DOE, de acordo com o Centro da Qualidade, Segurança e Produtividade para o Brasil e America Latina, (2005), devem ser as seguintes:

1. Determinar o problema a ser considerado e definir os objetivos de estudo;
2. Escolher os fatores a serem estudados, os intervalos de variação destes fatores e os níveis específicos de cada um;

3. Determinar a variável resposta apropriada e como mensurá-la;
4. Escolher o planejamento experimental adequado;
5. Executar o experimento;
6. Analisar estatisticamente os dados resultantes;
7. Tirar conclusões e fazer recomendações.

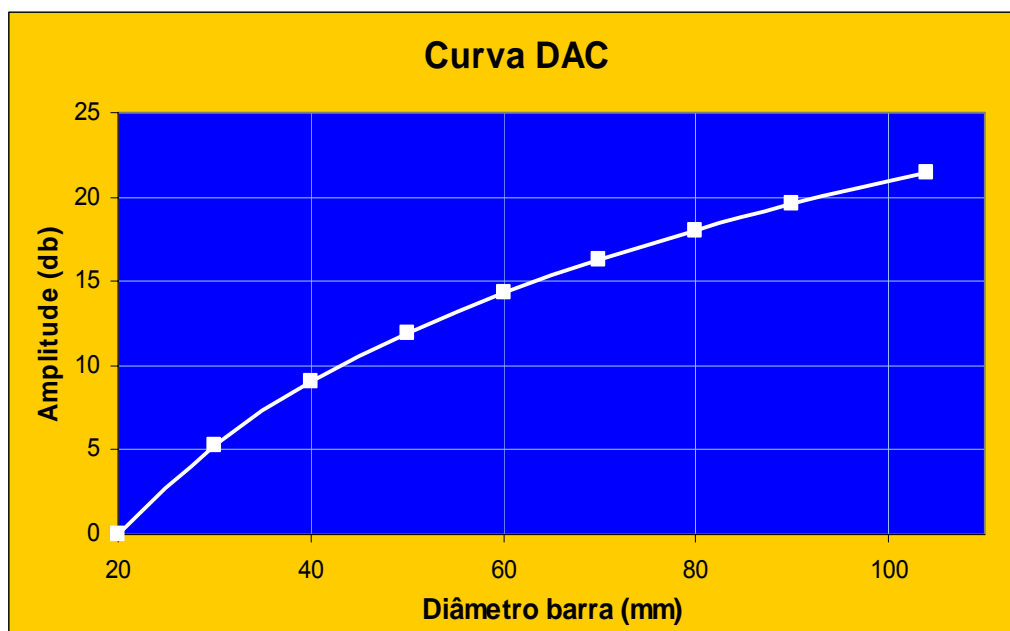


Figura 4.11 Ilustração da curva DAC calculada teoricamente. [Elaborado pela autora]

Assim, conforme Rotondaro, 2002, o DOE possui os seguintes termos estatísticos:

- Fatores (X): Entradas do processo, variáveis controláveis no experimento, cujo efeito se quer testar;
- Níveis: Cada um dos possíveis valores que um fator pode assumir no experimento;
- Resposta (Y): Saída do processo, variável dependente que será empregada para avaliar a influência dos fatores.

Para a definição da melhor combinação de variáveis, o ideal é a utilização do experimento fatorial completo, no qual as respostas são medidas em todas as combinações dos níveis dos fatores experimentais, através do software Minitab. Este estudo permite averiguar (i) quais as variáveis apresentam maior influência na resposta, (ii) se existem interações entre

dois, ou mais fatores e sua influência na resposta, bem como (iii) qual destas configurações irá otimizar a resposta.

Portanto, para o projeto em questão, serão determinados os fatores que possuem maior influência sobre a resposta, avaliando-os através de um Diagrama de Pareto. Também serão ajustados os fatores para que a resposta tenha o valor desejado, tendo uma menor variação na saída, buscando aumentar a capacidade do processo.

No caso estudado, os fatores e seus respectivos níveis serão:

- TRP: 500, 800, 1000, 1200, 1500 e 2000 Hz;
- Rotação: 1500 e 2000 RPM;
- Curva DAC: 1, 2 e 3 (Curva 3 desenvolvida Teoricamente, Figura 4.11).

A avaliação do DOE do presente trabalho será realizada através de um Experimento de Fatorial Completo, onde todas as possíveis combinações entre níveis de fatores são realizadas, permitindo avaliar qual (is) apresenta (m) a maior influência no resultado do teste (ROTONDARO, 2002). A montagem da estrutura do DOE está representada na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Estrutura do DOE apresentando fatores e níveis. [Elaborado pela autora]

Fatores	Níveis					
TRP	500	800	1000	1200	1500	2000
Rotação	1500	2000				
DAC	1	2	3			

Para finalizar as ações sobre as causas priorizadas na Matriz GUT, serão verificadas as etapas: Falta de Padrão Específico e Falta de Conhecimento do Melhor Método após os melhores resultados do DOE serem encontrados, conforme Capítulo 5 deste trabalho.

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do DOE estipulado no Capítulo 4, a programação de testes está definida na Tabela 5.1, na qual cada um dos parâmetros foi utilizado para avaliar os diferentes testes com suas respectivas variáveis. Na Tabela 5.1 são apresentados os defeitos detectados na barra padrão mapeada com os defeitos do tipo MnS, bem como a quantidade de vezes que o equipamento sinalizou e não existia defeitos no local, o que denomina-se defeitos falsos.

Tabela 5.1 Resposta do DOE na barra padrão mapeada contendo as discontinuidades tipo sulfeto de manganês. [Elaborado pela autora].

Teste	TRP	Rotação	DAC	Inclusões Detectadas	Indicações Falsas
1	500	1500	1	4	0
2	500	2000	1	4	0
3	1000	1500	1	5	0
4	1000	2000	1	5	0
5	1200	1500	1	6	0
6	1200	2000	1	7	0
7	800	1500	1	6	0
8	800	2000	1	6	0
9	2000	1500	1	8	14
10	2000	2000	1	8	13
11	1500	1500	1	4	0
12	1500	2000	1	7	0
13	500	1500	2	5	0
14	500	2000	2	5	0
15	1000	1500	2	5	0
16	1000	2000	2	6	0
17	1200	1500	2	5	0
18	1200	2000	2	5	0
19	800	1500	2	5	0
20	800	2000	2	5	0
21	2000	1500	2	5	0
22	2000	2000	2	7	0
23	1500	1500	2	4	0
24	1500	2000	2	7	0
25	1500	2000	3	8	0
26	500	1500	3	8	0
27	1000	2000	3	8	1
28	2000	1500	3	8	22
29	2000	2000	3	8	27
30	1200	1500	3	8	0
31	1200	2000	3	8	0
32	1000	1500	3	7	0
33	1500	1500	3	8	0
34	800	1500	3	6	0
35	800	2000	3	6	0
36	500	2000	3	6	0
Teste 100	1226	1500	2	8	3

A Figura 5.1 apresenta uma impressão da tela do equipamento automático na avaliação das descontinuidades existentes na barra padrão com inclusões reais tipo MnS. Visualizam-se as 8 inclusões detectadas conforme os traços superiores identificados na ilustração. A zona grifada da Tabela 5.1 mostra os parâmetros escolhidos para continuar nos testes, utilizando o critério de assertividade quanto à detecção das 8 inclusões existentes para a seleção dos melhores parâmetros, são eles Testes 25, 26, 27, 30, 31, 33 e 100 (este último não é avaliado no DOE devido à diferença no ajuste do equipamento).

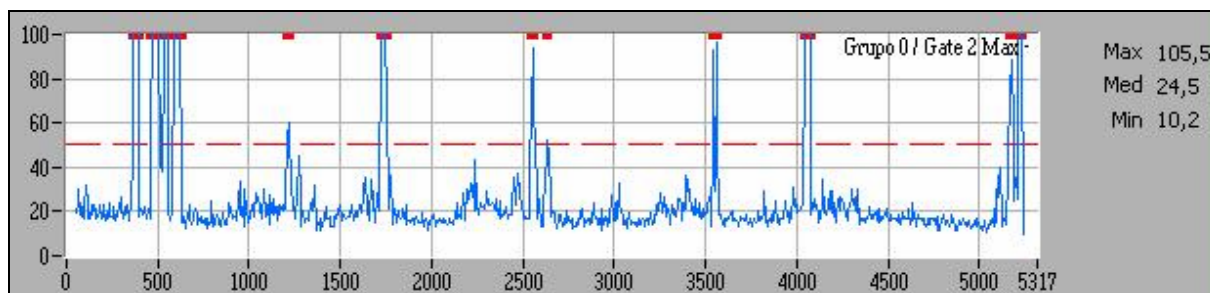


Figura 5.1 Tela do equipamento de US automático na detecção de descontinuidades na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]

5.1 Avaliação dos dados resultantes do DOE para descontinuidades detectadas na barra padrão mapeada com inclusões tipo MnS

Para avaliação destes dados, utilizou-se inicialmente o Diagrama de Pareto para determinar quais são os fatores significativos. Conforme o Centro da Qualidade, Segurança e Produtividade para o Brasil e America Latina, (2005), os termos importantes são aqueles nos quais as respostas médias nas configurações baixa e alta são significativamente diferentes, utilizando um nível de significância estatística $\alpha = 0,05$.

Através da avaliação dos valores P da Tabela ANOVA (Análise de Variância), pode-se identificar quais são os valores significativos para $\alpha = 0,05$, ou seja, quanto menores forem os valores de P, que geralmente ficam entre 0,05 e 0,01, correspondendo a 5%, ou 1% de significância estatística. Na Figura 5.2 estão apresentados os fatores significativos para descontinuidades detectadas e na Figura 5.3 seus respectivos valores de P que são TRP, com $P = 0,002$ e DAC com $P = .0,003$.

No caso estudado, somente os fatores TRP e DAC resultaram em uma influência significativa para defeitos detectados, o fator rotação, a interação dois a dois, ou entre os três fatores não tiveram resultados significativos.

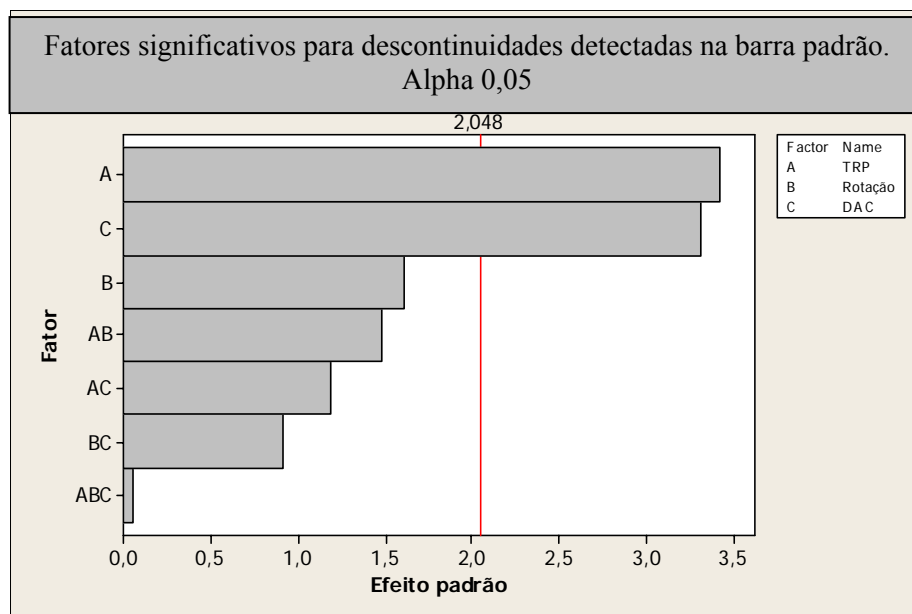


Figura 5.2 Fatores significativos para descontinuidades detectadas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]

Na Figura 5.3 é apresentada a resposta numérica da avaliação do DOE. No gráfico de interação, pode-se observar como interação não significativa quando as linhas do gráfico são praticamente paralelas, já a interação significativa representa uma variação nas linhas do gráfico, fato evidenciado a partir da avaliação do valor de P.

Na Figura 5.4 pode ser verificada a interação entre TRP e rotação, principalmente a variação da TRP de 1500, que apresenta uma ascensão íngreme ao comparar com a rotação 1500 e 2000, quanto maior este valor, melhor a detecção de descontinuidades.

Também observa-se uma variação significativa quando utiliza-se a DAC 1 e 3 com a TRP de 2000, identificando a maior detecção de descontinuidades. Outro fator importante é a maior interação entre a DAC 3 e as TRP variadas. Já na comparação entre rotação e DAC nota-se que tanto com a rotação 1500 quanto com 2000, a DAC 3 apresenta uma interação mais forte, constatando que esta combinação também se mostra mais adequada para a detecção das inclusões tipo MnS.

Multilevel Factorial Design					
Factors:	3	Replicates:	1		
Base runs:	36	Total runs:	36		
Base blocks:	1	Total blocks:	1		
Number of levels: 6; 2; 3					
Factorial Fit: Defeitos detectados versus TRP; Rotação; DAC					
* NOTE * This design has some botched runs. It will be analyzed using a regression approach.					
Estimated Effects and Coefficients for Defeitos detectados (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		6,3009	0,1841	34,22	0,000
TRP	1,9163	0,9581	0,2804	3,42	0,002
Rotação	0,5924	0,2962	0,1841	1,61	0,119
DAC	1,4929	0,7465	0,2255	3,31	0,003
TRP*Rotação	0,8314	0,4157	0,2804	1,48	0,149
TRP*DAC	-0,8137	-0,4068	0,3434	-1,18	0,246
Rotação*DAC	-0,4127	-0,2064	0,2255	-0,92	0,368
TRP*Rotação*DAC	0,0354	0,0177	0,3434	0,05	0,959
S = 1,08881 PRESS = 65,3421					
R-Sq = 52,33% R-Sq(pred) = 6,17% R-Sq(adj) = 40,42%					
Analysis of Variance for Defeitos detectados (coded units)					

Figura 5.3 ANOVA ilustrando os fatores e interações de maior significância para descontinuidades detectadas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]

Os principais efeitos considerados para a adesão são identificados pela linha que corta horizontalmente o gráfico da Figura 5.5. Neste caso, o gráfico irá mostrar o impacto mais relevante de cada nível para a detecção de descontinuidades somente para os fatores considerados significativos, que são a TRP e a curva DAC.

Para a TRP, os efeitos significativos são a partir de um valor de 1200 pulsos/s, ou seja, a TRP alta indica uma adesão mais forte, bem como a curva DAC 3 (Teórica) que também apresenta uma adesão mais significativa, o que significa maior influência para a detecção de descontinuidades.

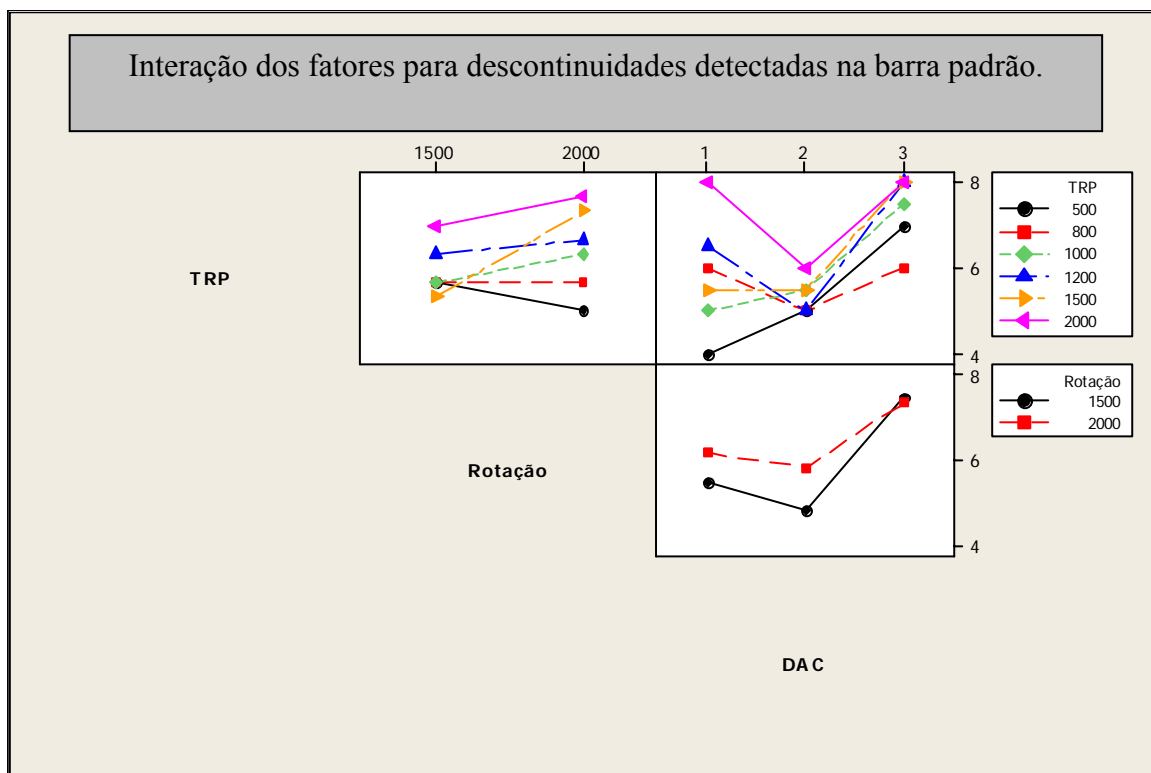


Figura 5.4 Interação dos fatores para descontinuidades detectadas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]

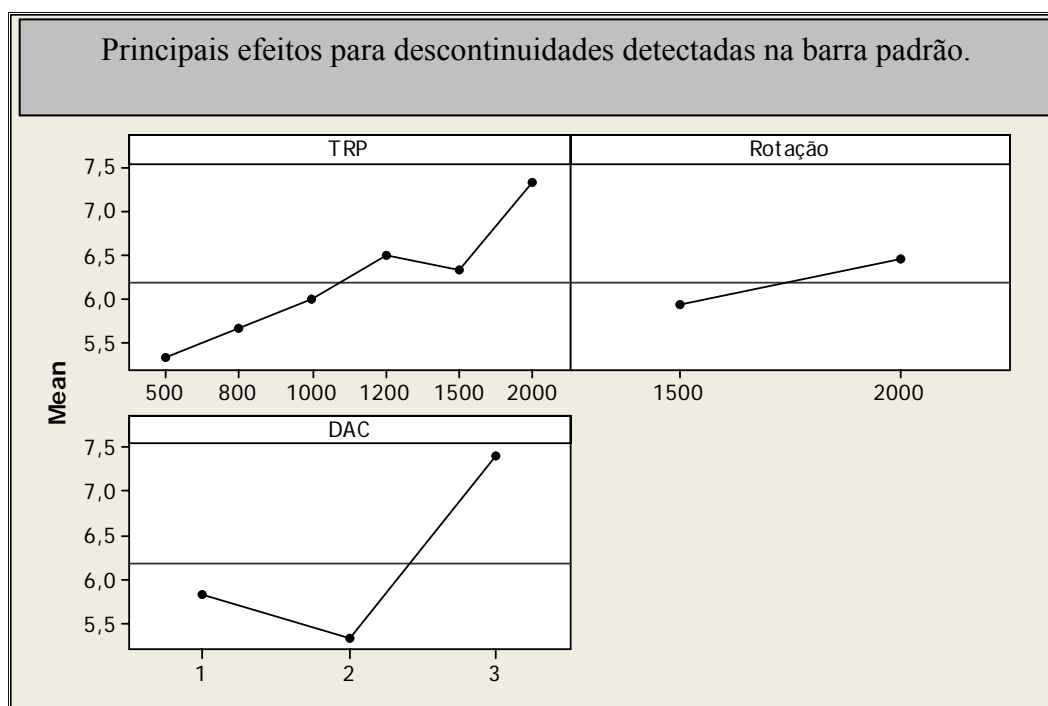


Figura 5.5 Principais efeitos para descontinuidades detectadas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]

5.2 Avaliação dos dados resultantes do DOE para indicações falsas detectadas na barra padrão mapeada com inclusões tipo MnS

Para avaliação das indicações falsas identificadas na barra padrão mapeada, utilizou-se a mesma técnica apresentada anteriormente para a detecção de inclusões tipo MnS. Inicialmente foi elaborado o Diagrama de Pareto para determinar quais são os fatores significativos.

Através da avaliação dos valores P da Tabela ANOVA, pode-se identificar quais são os valores significativos para $\alpha = 0,05$, considerando os menores valores de P. Na Figura 5.6 estão apresentados os fatores significativos para indicações falsas e na Figura 5.7 seus respectivos valores P que seria somente a TRP, com $P = 0,001$, sendo os demais valores acima de 0,1, não considerados significativos, o fator DAC, rotação, a interação dois a dois, ou entre os três fatores não apresentaram impacto relevante, conforme visualizado na Figura 5.6.

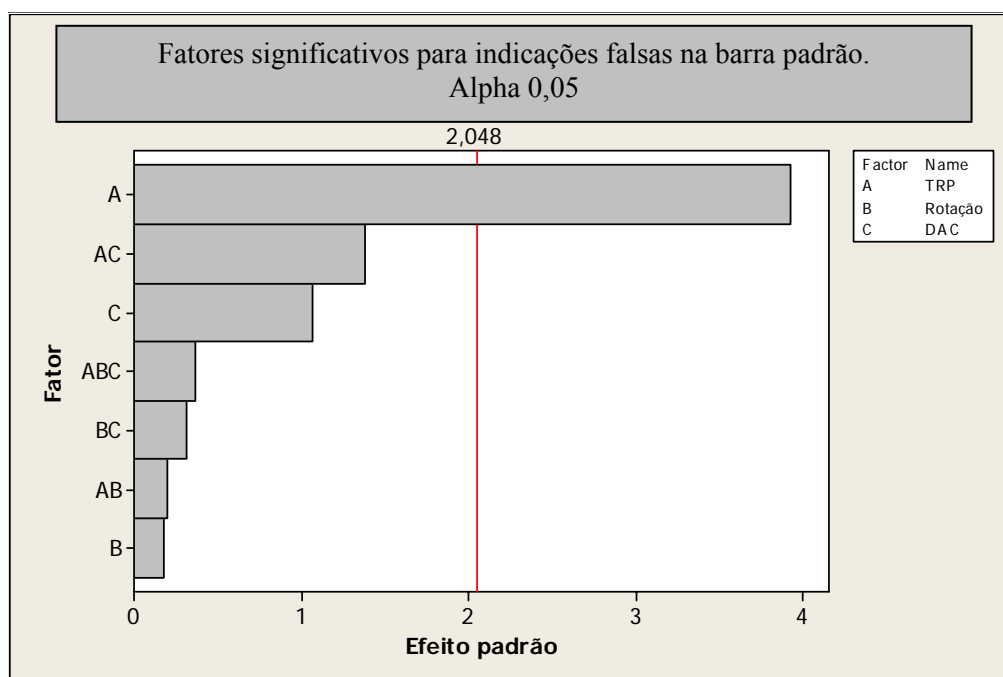


Figura 5.6 Fatores significativos para indicações falsas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]

Factorial Fit: Defeitos falsos versus TRP; Rotação; DAC

* NOTE * This design has some botched runs. It will be analyzed using a regression approach.

Estimated Effects and Coefficients for Defeitos falsos (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		2,7596	0,9346	2,95	0,006
TRP	11,1733	5,5867	1,4235	3,92	0,001
Rotação	0,3400	0,1700	0,9346	0,18	0,857
DAC	2,4522	1,2261	1,1447	1,07	0,293
TRP*Rotação	0,5601	0,2801	1,4235	0,20	0,845
TRP*DAC	4,8202	2,4101	1,7434	1,38	0,178
Rotação*DAC	0,7258	0,3629	1,1447	0,32	0,754
TRP*Rotação*DAC	1,2824	0,6412	1,7434	0,37	0,716

S = 5,52693 PRESS = 2935,07
R-Sq = 39,52% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 24,41%

Analysis of Variance for Defeitos falsos (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	493,26	506,581	168,860	5,53	0,004
2-Way Interactions	3	61,60	62,630	20,877	0,68	0,570
3-Way Interactions	1	4,13	4,132	4,132	0,14	0,716
Residual Error	28	855,31	855,313	30,547		
Total	35	1414,31				

Unusual Observations for Defeitos falsos

Figura 5.7 ANOVA ilustrando os fatores e interações de maior significância para indicações falsas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]

Na Figura 5.7 é apresentada a resposta numérica da avaliação do DOE. No gráfico de interação, pode-se observar como interação não significativa quando as linhas do gráfico são praticamente paralelas, na Figura 5.8 exemplificada pela interação entre TRP e Rotação, praticamente horizontais quando ambas são variadas, impactando somente o fator TRP, com maior influência para a TRP de 2000.

Já na comparação de TRP com a curva DAC, pode-se observar que a DAC 3 e a TRP de 2000 apresentam uma interação bastante destacada, o que significa a maior ocorrência de indicações falsas nesta combinação, fato que também ocorre com menor intensidade para a combinação DAC 1 e TRP 2000. Pelas avaliações, a TRP de 2000 não está alinhada com o objetivo do trabalho, pois apresenta um número elevado de indicações falsas. A relação DAC e rotação não apresentou interação significativa.

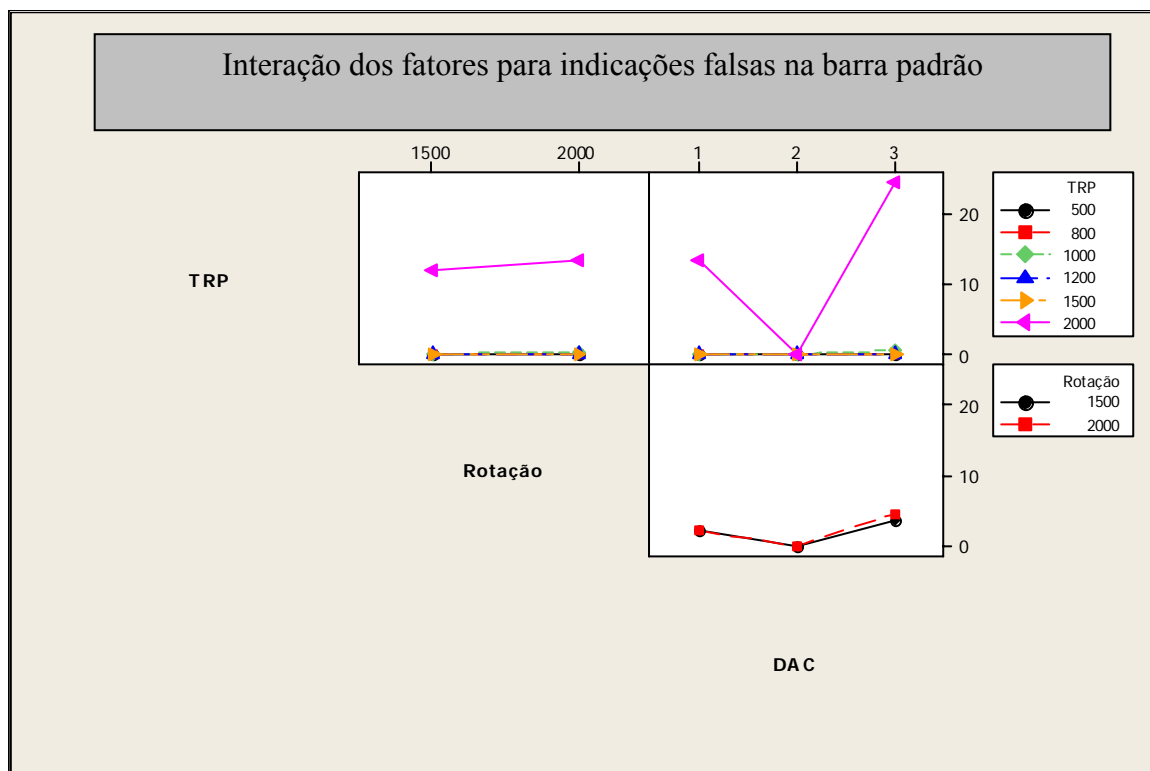


Figura 5.8 Interação dos fatores para defeitos falsos na barra padrão mapeada contendo defeitos do tipo sulfeto. [Elaborado pela autora]

Os principais efeitos considerados para a adesão, com valores maiores que 6,0, identificados pela linha que corta horizontalmente o gráfico da Figura 5.9, indica quais são os efeitos para TRP, que foi considerado o fator significativo. A TRP alta, com o valor de 2000 indica uma adesão mais forte, ou seja, uma contribuição maior para a ocorrência de indicações falsas, bem como a curva DAC 3 (Teórica) que também apresenta uma adesão levemente significativa.

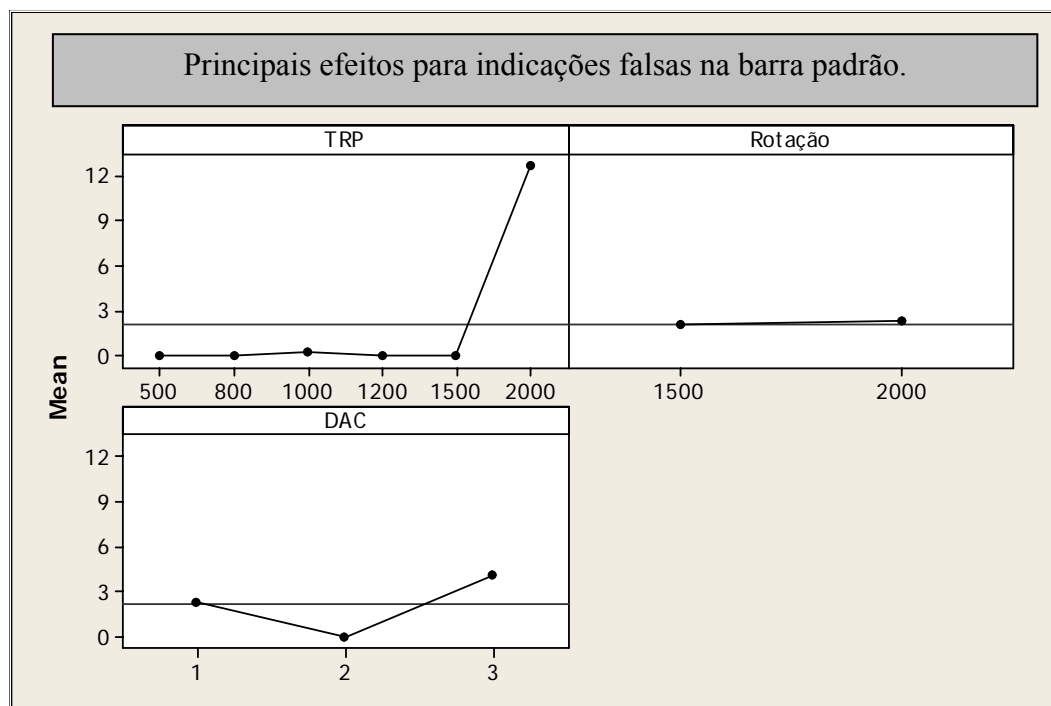


Figura 5.9 Principais efeitos para indicações falsas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]

5.3 Confirmação dos dados obtidos no DOE via avaliação das 32 descontinuidades existentes no lote

Para a confirmação destes resultados foi utilizado um lote de 8 barras mapeadas, contendo inclusões do tipo MnS, além da barra padrão mapeada, totalizando 32 descontinuidades reais, apresentadas nas Figuras 5.10 a 5.17. O mapeamento das figuras apresentadas identifica a posição das inclusões ao longo do comprimento da barra, a amplitude do sinal avaliado com o US manual e a numeração da descontinuidade para permitir a compreensão dos resultados no US automático.

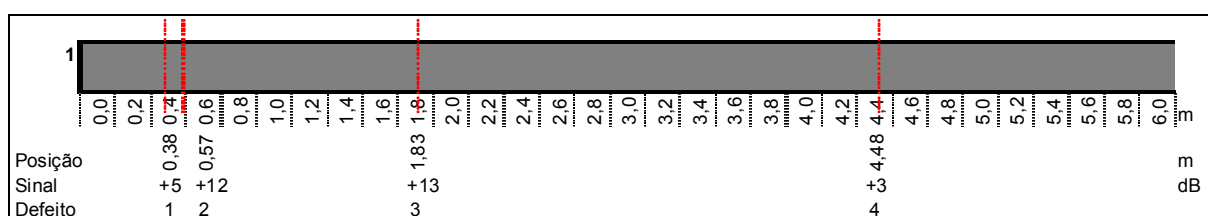


Figura 5.10 Barra 1 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]

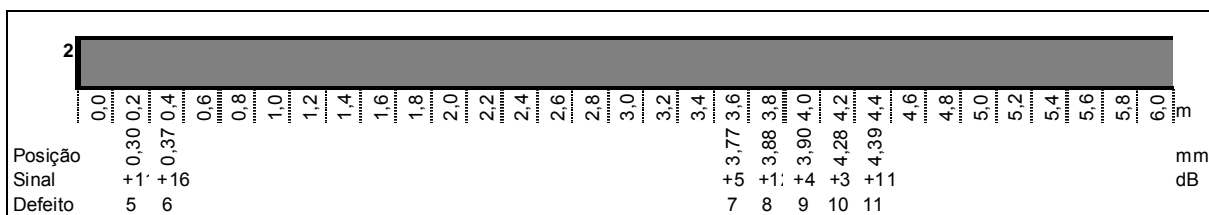


Figura 5.11 Barra 2 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]

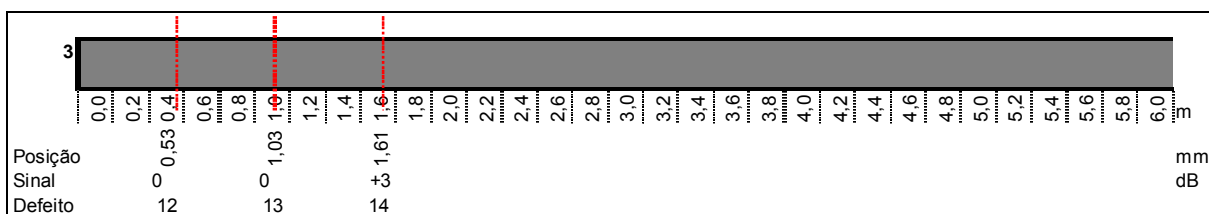


Figura 5.12 Barra 3 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]

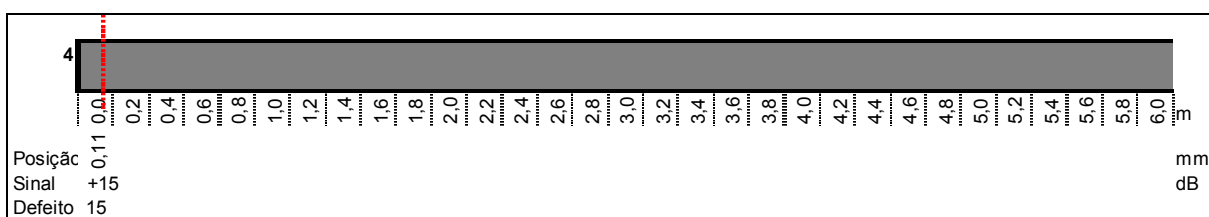


Figura 5.13 Barra 4 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]

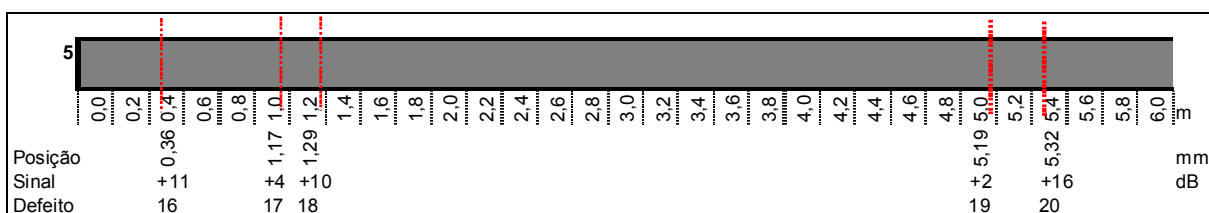


Figura 5.14 Barra 5 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]

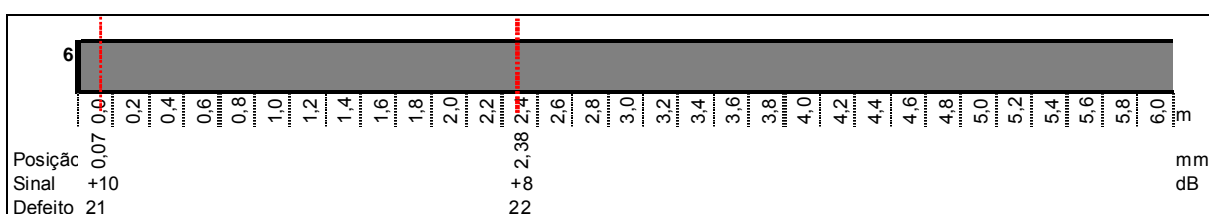


Figura 5.15 Barra 6 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]

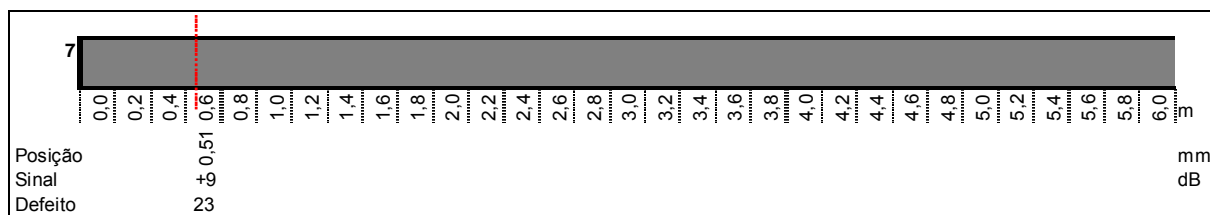


Figura 5.16 Barra 7 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]

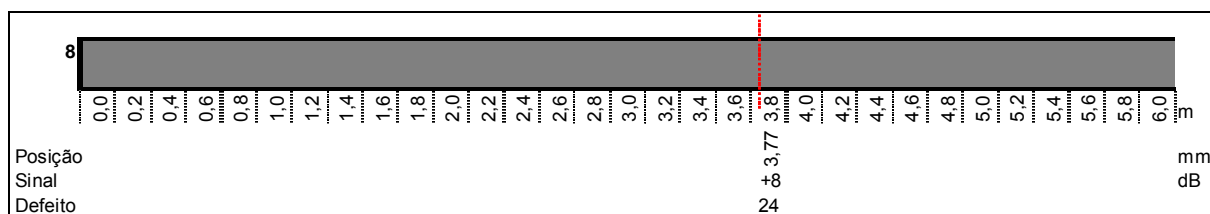


Figura 5.17 Barra 8 mapeada do lote utilizado para validação do DOE. [Elaborado pela autora]

Os testes nas barras do lote foram realizados passando cada barra no equipamento de US automático em linha três vezes com as calibrações pré-estipuladas na Tabela 5.1. Os resultados foram compilados em uma tabela e, pelo critério de assertividade, ou seja, descontinuidades existentes *versus* descontinuidades detectadas, foram escolhidos os melhores conjuntos de parâmetros, denominados testes.

Os resultados dos testes no US automático estão apresentados na Tabela 5.2, a coluna Total mostra o total de descontinuidades existentes em cada barra. Comparando os resultados de descontinuidades detectadas em cada teste e a resposta das análises do DOE realizado, os pré-selecionados foram os Testes 100, 25, 26, 27, 30, 31 e 33. Com exceção do Teste 100, que estava sendo utilizado no primeiro ajuste estipulado anterior à decisão de melhorar os resultados de detecção de indicações falsas, os demais testes confirmam as melhoras variáveis do DOE, utilizando a curva DAC 3 e a melhor combinação dos demais fatores.

Estipulou-se um patamar mínimo de 95% para a assertividade na detecção. Assim, foi realizada uma nova seleção onde os testes 100, 30 e 31 evidenciaram os melhores resultados, todos apresentando um resultado de assertividade igual a 97% e erro igual a 3,1%. O erro é a falha na detecção de uma descontinuidade existente no material.

Os resultados dos testes no US automático para avaliação das indicações falsas detectadas estão apresentados na Tabela 5.3. Estipulou-se um patamar máximo de indicações falsas de 20%, índice que a linha de inspeção pode absorver sem ocasionar a parada do processo para a avaliação manual.

Assim, foram selecionados os testes 26, 30 e 31, respectivamente apresentando índices de indicações falsas de 13,86%, 18,42% e 13,08%. Utilizando uma análise mais detalhada, foram priorizados somente os Testes 30 e 31, já que no critério de assertividade, o Teste 26 ficou abaixo do estipulado, com 91% e no critério de índice de indicações falsas o Teste 100 ficou acima do previsto, com 52,06%.

Tabela 5.2 Planilha do total de inclusões reais detectadas e não detectadas em cada teste na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]

	Teste 100	Teste 25	Teste 26	Teste 27	Teste 30	Teste 31	Teste 33	TOTAL
Barra 1	4	3	3	3	4	4	4	4
Barra 2	7	7	7	7	7	7	7	7
Barra 3	3	2	2	2	2	2	3	3
Barra 4	1	1	1	1	1	1	1	1
Barra 5	4	4	4	3	5	5	4	5
Barra 6	2	2	2	1	2	2	1	2
Barra 7	1	1	1	1	1	1	1	1
Barra 8	1	1	1	1	1	1	1	1
Barra Padrão	8	8	8	8	8	8	8	8
	31	29	29	27	31	31	30	32
Assertividade	97%	91%	91%	84%	97%	97%	94%	
Erro	3,1%	9,4%	9,4%	15,6%	3,1%	3,1%	6,3%	

Tabela 5.3 Planilha do total de indicações falsas em cada teste na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]

	Teste 100	Teste 25	Teste 26	Teste 27	Teste 30	Teste 31	Teste 33
Mínimo	25	13	3	5	4	4	9
Médio	28	14	3	8	8	4	9
Máximo	48	19	8	11	9	6	13
Média	33,7	15,3	4,7	8,0	7,0	4,7	10,3
Defeitos reais + falsos	64,7	44,3	33,7	35,0	38,0	35,7	40,3
Índice indicações falsas	52,06%	34,59%	13,86%	22,86%	18,42%	13,08%	25,62%

Na Figura 5.18 está ilustrado o gráfico comparativo entre descontinuidades detectadas *versus* indicações falsas, quanto maior a distância entre as duas linhas, mais adequado será o ajuste, objetivando sempre o mínimo de indicações falsas. O Teste 100 mostra uma disparidade muito grande em relação ao índice de indicações falsas, enquanto o Teste 31 se mostra mais adequado ao objetivo.

Na Figura 5.19 está ilustrado o gráfico comparativo entre assertividade *versus* indicações falsas, em percentual. Quanto maior a distância entre as duas linhas, mais

adequado está o ajuste. Novamente o Teste 100 mostra uma disparidade maior em relação ao índice de indicações falsas, enquanto o Teste 31 se mostra mais adequado ao objetivo.

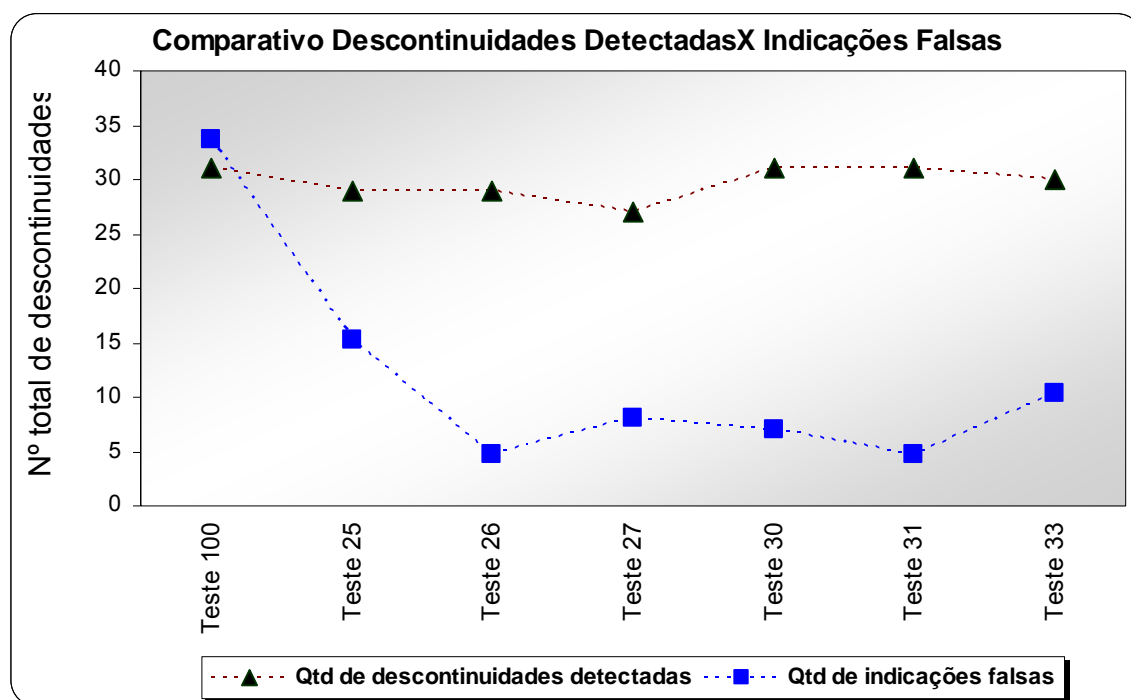


Figura 5.18 Comparativo entre descontinuidades detectadas e indicações falsas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]

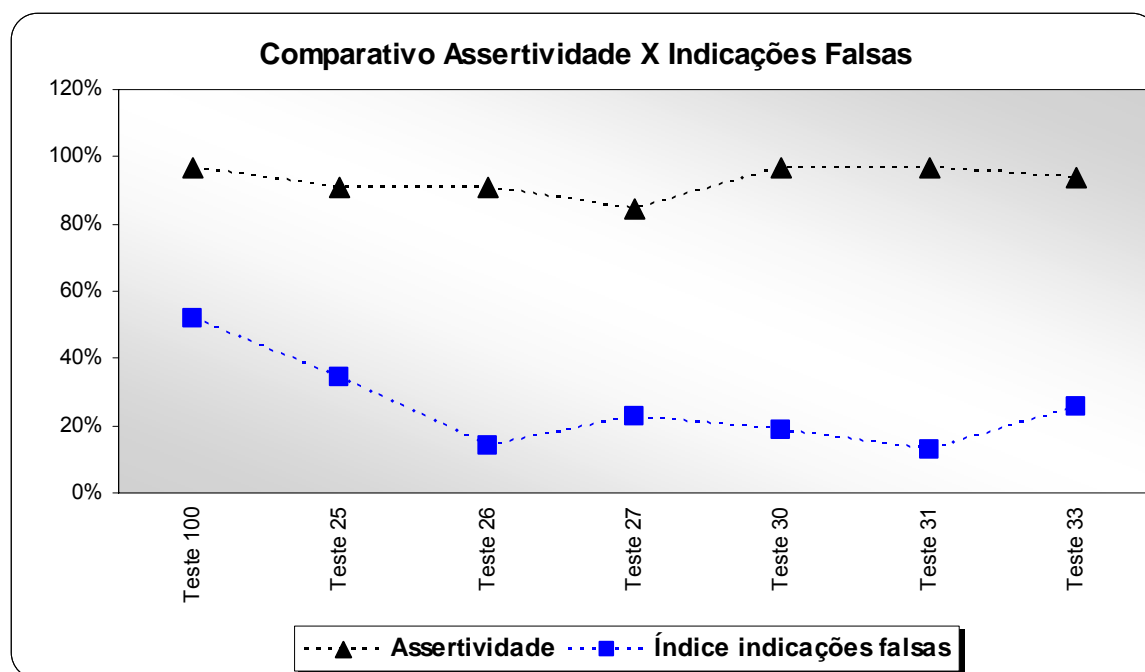


Figura 5.19 Comparativo entre assertividade e indicações falsas na barra padrão mapeada contendo inclusões tipo MnS. [Elaborado pela autora]

5.4 Avaliação dos dados obtidos nos testes via Análise dos Sistemas de Medição (MSA)

Para a avaliação imparcial dos resultados obtidos até o momento, utilizou-se os dados dos testes realizados para a elaboração de um MSA. De acordo com MSA 3ª Edição (2002), muitas vezes assume-se que as medições são exatas e freqüentemente a análise e conclusões são baseadas em suposições. Quando uma falha individual ocorre, o sistema de medição varia afetando a medida individual e, conseqüentemente, a decisão é baseada neste dado. Erros nos sistemas de medição podem ser classificados em cinco categorias: Tendência (Bias), repetibilidade, reprodutibilidade, estabilidade e linearidade.

No caso estudado será realizada uma Análise do Sistema de Medição (MSA) por atributo. O método atributo é utilizado quando se tem um valor medido apresentando um número finito de categorias. O mais comum é o tipo passa-não-passa no qual existem somente duas possibilidades de resultados. Outros sistemas por atributo, por exemplo o padrão visual, resulta de cinco a sete categorias de distinção.

O estudo é realizado através da avaliação das discontinuidades existentes em cada uma das barras testadas, não mais considerando as barras em si, mas as 32 discontinuidades. Foram utilizadas 80 repetições, conforme Anexos 1 ao 4 e divididos os testes três a três. Foram elaborados dois testes distintos devido à planilha ser criada para comparar três avaliadores (no caso três inspeções) de cada vez, como existem quatro, foi repetido um dos testes em cada tabela, propositalmente o Teste 31, que foi assumido como mais adequado, pelas avaliações anteriores.

Conforme parágrafo anterior, para o estudo de atributo são necessárias três repetições na avaliação por US automático para cada barra contendo as inclusões tipo MnS. Esta repetição será realizada para cada um dos testes selecionados na primeira etapa, que são os Testes 100, 30, 31, além destes, também será avaliado o Teste 33, que apresentou acima de 94% de assertividade. Novamente utilizou-se o Teste 100 pelo quesito assertividade. As tabelas criadas para a avaliação dos quatro testes, três a três são apresentadas nos Anexos 1 ao 4. A primeira análise será com os Testes 30, 31 e 100 e a segunda avaliando os Testes 31, 33 e 100.

No caso estudado e apresentado na Tabela 5.4, o valor 1 significa que a discontinuidade existente foi detectada e o valor 0 que a discontinuidade existente não foi

Tabela 5.5 Dados para a realização do MSA contendo as indicações falsas nos testes com as 8 barras do lote, considerando também a barra padrão mapeada. [Elaborado pela autora]

Descontinuidade	Teste 100 -			Teste 25 -			Teste 26 -			Teste 27 -			Teste 30 -			Teste 31 -			Teste 33 -		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
33	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
34	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
36	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
37	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
38	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
39	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
42	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
43	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
44	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
45	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
46	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
47	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
48	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

5.4.1 Avaliação dos dados obtidos nos testes via Análise dos Sistemas de Medição (MSA) para os Testes 30, 31 e 100

Na tabulação cruzada, cada teste é cruzado com outro para a visualização de sua interação e o nível de concordância, através da avaliação de *Kappa* Equação 5.1, onde o valor 1 (A) indica peça aprovada, neste caso, peça sem indicação e o valor 0 (R) indica a peça reprovada, de acordo com Apostila do Participante (2004), visualizados nos Anexos 1 ao 4. Esta análise é utilizada para determinar se existe alguma divergência entre os diferentes testes no equipamento automático (avaliadores), o que não garante que o sistema de medição é adequado para classificar peças boas ou ruins.

$$Kappa = \frac{po - pe}{1 - pe} \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde:

po = soma das proporções observadas da diagonal principal da célula (reprovado-reprovado e aprovado-aprovado) dividido pelo total geral

pe = soma das proporções esperadas da diagonal principal da célula (reprovado-reprovado e aprovado-aprovado) dividido pelo total geral

Conforme MSA 3ª Edição (2002), *Kappa* é a medida da razão do teste. O valor de $Kappa > 0,75$ indica muito boa concordância (com um *Kappa* máximo = 1); valores $< 0,40$ indicam uma péssima concordância.

De acordo com a Tabela 5.6, tanto a comparação do Teste 100 com o teste 31, quanto a comparação do Teste 100 com o Teste 30 têm uma baixa concordância entre si, principalmente devido ao fato já avaliado anteriormente referente à quantidade de indicações falsas no Teste 100. Já os Testes 31 e 30 possuem uma boa concordância medida pelo resultado de $Kappa = 0,88$.

Com esta informação, é desenvolvida uma tabulação cruzada comparando os diferentes testes no equipamento automático (avaliadores) com a decisão de referência. O *kappa* também é calculado, seguindo a mesma equação.

De acordo com a Tabela 5.7, os Testes 30 e 31 apresentam uma boa concordância com a referência, com valores de *Kappa* respectivamente iguais a 0,77 e 0,86, mais adequados ainda para o último Teste. Já o Teste 100 não apresenta uma boa concordância com a referência por apresentar um valor de *Kappa* de 0,21.

Para a tomada de decisão é necessário o cálculo da eficácia que é a probabilidade de classificação errada e a probabilidade de falso alarme.

O cálculo da eficácia do sistema de medição mede a capacidade dos diferentes testes no equipamento automático em classificar um item como conforme ou não - conforme, Equação 5.2. O índice varia de 0 a 1, sendo 1 a perfeição em termos de classificação, conforme MSA 3ª Edição (2002).

$$E = \frac{\text{Número de itens classificados corretamente}}{\text{Total de oportunidades de acerto}} \quad \text{Equação 5.2}$$

O cálculo da probabilidade de classificação errada (P(CE)), Equação 5.3, identifica a probabilidade de se aceitar um item não conforme, este erro é considerado grave por permitir o aceite de itens ruins.

$$P(CE) = \frac{\text{Número de classificações erradas}}{\text{Número de oportunidades de classificações erradas}} \quad \text{Equação 5.3}$$

Tabela 5.6 Tabulação cruzada relação entre métodos – resposta do MSA para os Testes 30, 31 e 100. [Elaborado pela autora]

		31		Total	30	31
		R	A		p _o	
30	R	Observado	102	9	111	0,942
		Esperado	49,49	61,51		
	A	Observado	5	124	129	p _e
		Esperado	57,51	71,49		
Total		107	133	240	0,504	

		100		Total	31	100
		R	A		p _o	
31	R	Observado	103	4	107	0,613
		Esperado	85,6	21,4		
	A	Observado	89	44	133	p _e
		Esperado	106,4	26,6		
Total		192	48	240	0,468	

		100		Total	30	100
		R	A		p _o	
30	R	Observado	108	3	111	0,638
		Esperado	88,8	22,2		
	A	Observado	84	45	129	p _e
		Esperado	103,2	25,8		
Total		192	48	240	0,478	

Métodos		Kappa	Análise
100	31	0,27	Os métodos têm uma baixa concordância entre si
100	30	0,31	Os métodos têm uma baixa concordância entre si
31	30	0,88	Os métodos têm uma boa concordância entre si

O cálculo de probabilidade de falso alarme (P(FA)), Equação 5.4, identifica a probabilidade de se rejeitar um item conforme. Este erro, a princípio, não é extremamente grave, mas pode gerar altos custos com retrabalhos e re-inspeções, ainda, no caso estudado, pode deixar o poder decisivo nas mãos do operador, o que também causa um problema de confiabilidade.

$$P(FA) = \frac{\text{Número de falsos alarmes}}{\text{Número de oportunidades para falsos alarmes}} \quad \text{Equação 5.4}$$

Tabela 5.7 Tabulação cruzada relação com a referência – resposta do MSA para os Testes 30, 31 e 100. [Elaborado pela autora]

		REF		Total	30	
		R	A		p_o	
30	R	Observado	90	21	111	0,89
		Esperado	44,40	66,60		
	A	Observado	6	123	129	p_e
		Esperado	51,60	77,40		
Total		96	144	240	0,51	

		REF		Total	31	
		R	A		p_o	
31	R	Observado	93	14	107	0,93
		Esperado	42,8	64,2		
	A	Observado	3	130	133	p_e
		Esperado	53,2	79,8		
Total		96	144	240	0,51	

		REF		Total	100	
		R	A		p_o	
100	R	Observado	91	101	192	0,56
		Esperado	76,80	115,20		
	A	Observado	5	43	48	p_e
		Esperado	19,20	28,80		
Total		96	144	240	0,44	

Método	Kappa	Análise
30	0,77	O método 30 tem uma boa concordância com a referência
31	0,86	O método 31 tem uma boa concordância com a referência
100	0,21	O método 100 tem uma baixa concordância com a referência

A Tabela 5.8 mostra os parâmetros resultantes da aplicação do MSA para o resultado de cada teste realizado no equipamento de inspeção automática.

Na avaliação realizada na Tabela 5.8, o método (Teste) 31 apresentou os melhores resultados, sendo eles eficácia de 92,9%, probabilidade de falso alarme de 9,7% e probabilidade de classificações erradas de 3,1%.

Tabela 5.8 Resposta do MSA para os Testes 30, 31 e 100. [Elaborado pela autora]

Método	Boas Corretas	Ruins Corretas	Total Correto	Classific. Errada	Falsos Alarmes	Total Geral
30	123	90	213	6	21	240
31	130	93	223	3	14	240
100	43	91	134	5	101	240

Método	Eficácia	P (FA)	P (CE)
30	88,8%	14,6%	6,3%
31	92,9%	9,7%	3,1%
100	55,8%	70,1%	5,2%

Conforme o MSA 3ª Edição (2002), para o estudo de atributo não existe fundamentação teórica quando da aceitação, ou não, do resultado. Os critérios de aceitação são definidos por um grupo conhecedor do assunto, considerando as seguintes questões:

- Os parâmetros de aceitação para este processo necessitam ser mudados?
- Estes riscos são aceitáveis?
- Os avaliadores precisam ser treinados?
- O ambiente do teste deve ser melhorado?
- Mais importante, o que o cliente conhece sobre este sistema de medição e estes resultados – o que ele espera?
- O cliente aceita este nível de risco?

Estes resultados mostram que o sistema tem diferentes níveis de desempenho para eficácia, classificação errada e falso alarme dependendo do teste. O Teste 31 apresentou os melhores valores de E, P(CE) e P(FA).

5.4.2 Avaliação dos dados obtidos nos testes via Análise dos Sistemas de Medição (MSA) para os Testes 31, 33 e 100

Para a segunda avaliação, foram cruzados os Testes 31, 33 e 100, apresentados na Tabela 5.9, tabulação cruzada entre métodos.

De acordo com a Tabela 5.9, tanto a comparação do Teste 100 com o teste 31, quanto a comparação do Teste 100 com o Teste 33 mostram uma baixa concordância entre si, principalmente devido ao fato já avaliado anteriormente referente à quantidade de indicações falsas no Teste 100. Já os Testes 31 e 33 possuem uma boa concordância avaliando o resultado de $Kappa = 0,83$.

De acordo com a Tabela 5.10, o Teste 33 apresenta uma média concordância com a referência, com valor de $Kappa$ igual a 0,70, já o Teste 31 apresenta o mesmo resultado descrito anteriormente, com uma boa concordância com a referência, com valor de $Kappa$ igual 0,86. Da mesma maneira que a avaliação anterior, o Teste 100 não apresenta uma boa concordância com a referência por apresentar um valor de $Kappa$ de 0,21. Novamente o Teste 31 se mostrou o mais adequado para o objetivo requerido.

Tabela 5.9 Tabulação cruzada relação entre métodos – resposta do MSA para os Testes 31, 33 e 100. [Elaborado pela autora]

Tabulação Cruzada						
		31		Total	33	31
		R	A		p_o	
33	R	Observado	104	18	122	0,913
		Esperado	54,39	67,61		
	A	Observado	3	115	118	p_e
		Esperado	52,61	65,39		
Total		107	133	240	0,499	
		100		Total	31	100
		R	A		p_o	
31	R	Observado	103	4	107	0,613
		Esperado	85,6	21,4		
	A	Observado	89	44	133	p_e
		Esperado	106,4	26,6		
Total		192	48	240	0,468	
		100		Total	33	100
		R	A		p_o	
33	R	Observado	119	3	122	0,683
		Esperado	97,6	24,4		
	A	Observado	73	45	118	p_e
		Esperado	94,4	23,6		
Total		192	48	240	0,505	
Métodos		Kappa	Análise			
100	31	0,27	Os métodos têm uma baixa concordância entre si			
100	33	0,36	Os métodos têm uma baixa concordância entre si			
31	33	0,83	Os métodos têm uma boa concordância entre si			

Tabela 5.10 Tabulação cruzada relação com a referência – resposta do MSA para os Testes 31, 33 e 100. [Elaborado pela autora]

		REF		Total	33	
		R	A		p_o	
33	R	Observado	91	31	122	0,85
		Esperado	48,80	73,20		
	A	Observado	5	113	118	p_e
		Esperado	47,20	70,80		
Total		96	144	240	0,50	
		REF		Total	31	
		R	A		p_o	
31	R	Observado	93	14	107	0,93
		Esperado	42,8	64,2		
	A	Observado	3	130	133	p_e
		Esperado	53,2	79,8		
Total		96	144	240	0,51	
		REF		Total	100	
		R	A		p_o	
100	R	Observado	91	101	192	0,56
		Esperado	76,80	115,20		
	A	Observado	5	43	48	p_e
		Esperado	19,20	28,80		
Total		96	144	240	0,44	
Método	Kappa	Análise				
33	0,70	O método 33 tem uma média concordância com a referência				
31	0,86	O método 31 tem uma boa concordância com a referência				
100	0,21	O método 100 tem uma baixa concordância com a referência				

Na avaliação realizada na Tabela 5.11, o método (Teste) 31 continuou apresentando os melhores resultados, sendo eles eficácia de 92,9%, probabilidade de falso alarme de 9,7% e probabilidade de classificações erradas de 3,1%.

O Teste 31 apresentou os melhores valores de E, P(CE) e P(FA). O grupo especialista no desempenho de US automático considera os resultados do Teste 31 satisfatórios para a aplicação desejada. Com este resultado, o Teste 31 foi definido como parâmetro de ajuste do equipamento automático para avaliar o material de bitola 104 mm contendo inclusões tipo MnS.

Conforme os dois últimos itens priorizados na matriz GUT: Falta de Padrão Específico e Falta de Conhecimento do Melhor Método, foi definido o melhor método de ajuste, apresentado neste capítulo, bem como os melhores parâmetros.

O melhor método foi padronizado, definindo (i) o melhor ajuste utilizando a verificação das sondas e a detecção das 8 inclusões tipo MnS da barra padrão mapeada e (ii) os melhores parâmetros: taxa de repetição de pulso (TRP) de 1200 pulsos/s, rotação de 2000 RPM, curva de correção amplitude distância (DAC) número 3 teórica. Por fim, a equipe foi treinada para melhor atender estes parâmetros.

Tabela 5.11 Resposta do MSA para os Testes 31, 33 e 100. [Elaborado pela autora]

Método	Boas Corretas	Ruins Corretas	Total Correto	Classific. Errada	Falsos Alarmes	Total Geral
33	113	91	204	5	31	240
31	130	93	223	3	14	240
100	43	91	134	5	101	240
Método	Eficácia	P (FA)	P (CE)			
33	85,0%	21,5%	5,2%			
31	92,9%	9,7%	3,1%			
100	55,8%	70,1%	5,2%			

6.0 CONCLUSÕES

Com as atuais características dos processos de fabricação de aço existentes em uma usina siderúrgica, o nível de 100% de assertividade e 0% de índice de indicações falsas é praticamente inviável de ser alcançado no ambiente produtivo. Caso o processo fosse realizado de outra maneira, haveria uma grande possibilidade de elevação dos custos de inspeção, abalando a capacidade competitiva da empresa.

A coleta de dados do trabalho realizado foi facilitada pela existência de um controle adequado no equipamento de inspeção automático, permitindo a correta compreensão e resolução do problema. Os testes realizados apresentaram diferentes respostas relativas à inspeção do material de bitola com circunferência de 104 mm. Alguns deles se mostraram robustos e confiáveis o suficiente para garantir uma inspeção com uma alta assertividade e com o menor índice de indicações falsas possível.

A partir de um comparativo entre os testes realizados com a primeira padronização proposta no início do trabalho, o “Teste 100”, se obteve um ganho significativo. Após o desenvolvimento do DOE garantiu-se a mesma assertividade utilizada anteriormente, porém com um índice de indicações falsas muito inferiores, passando de 52,06% no teste inicial para 13,08% no Teste 31, sendo então este o mais confiável.

O Teste 31 apresentou os melhores parâmetros, dentre eles taxa de repetição de pulso (TRP) de 1200 pulsos/s, rotação de 2000 RPM, curva de correção amplitude distância (DAC) número 3 teórica, além do ajuste mais adequado, estipulado através dos pontos falhos identificados na matriz GUT.

A meta proposta de detectar as 32 discontinuidades existentes nas barras do lote avaliado e nenhuma indicação falsa não conseguiu ser atingida com as variações e combinações propostas. Mesmo assim, com o alcance dos melhores resultados no Teste 31, representando 97% de assertividade, a inspeção do material se tornou mais confiável,

principalmente pela diminuição no índice de indicações falsas, que resultou, em torno de 13%.

Com os resultados dos testes foi possível melhorar a inspeção no equipamento de US automático, não somente para garantir a detecção das inclusões tipo MnS, mas também para avaliar os demais tipos de descontinuidades existentes na usina siderúrgica. Estas melhorias foram possíveis principalmente através da definição do ajuste que garanta o bom funcionamento de todas as variáveis controláveis do equipamento, bem como a introdução de melhores práticas de manutenção autônoma, estabelecendo rotinas de limpeza e manutenções necessárias no equipamento. Os parâmetros foram padronizados para garantir o correto gerenciamento da rotina.

7.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como principal objetivo a detecção confiável de um tipo específico de inclusão denominada sulfeto de manganês, em uma bitola previamente determinada, sem modificar qualquer parte mecânica do equipamento de US automático. Foi utilizado somente um equipamento específico de US para testar o material, ajustando o equipamento com uma barra padrão com defeitos do tipo furo transversal.

Como sugestão para trabalhos futuros, em primeiro lugar, seria ideal trabalhar na solução do problema do tipo sulfeto de manganês na etapa de Aciaria, no ajuste de composição química, resfriamento controlado, ou na etapa de lingotamento contínuo. Caso não seja possível eliminar totalmente este tipo de descontinuidade, o trabalho poderá envolver a modificação dos sulfetos.

O tipo de MnS que foi tratado no trabalho está relacionado ao mais crítico, o ideal seria modificar de sulfeto Tipo II, secundário, formado no final da solidificação, fragilizando mais o material, para um sulfeto Tipo III, primário, que surge no aço ainda líquido, o qual apresenta menor fragilização e morfologia mais adequada para a detecção em equipamentos de US manual e automático.

Outro teste válido seria variar a bitola do material de partida ou do próprio material para verificar a ocorrência e modificação do sulfeto e como funciona a sua detecção; isto é, se esta descontinuidade é modificada após a conformação durante a laminação, ou se é invariável. Com esta informação poderia ser produzido e comercializado o material em uma bitola diferente, dependendo da aceitação do cliente.

Na questão da variação da bitola, também poderia ser trabalhada a modificação da Coluna D'água, que hoje é fixa no equipamento de US automático. Para bitolas mais finas esta questão é de grande importância para obter um acoplamento ideal.

Como os testes foram realizados com o mesmo equipamento, não foram obtidas respostas sobre a influência dos parâmetros fixos do equipamento na detecção das

descontinuidades. Os testes em outro modelo de equipamento poderiam trazer respostas diferentes aos problemas identificados na detecção das inclusões tipo sulfeto de manganês.

Não foram realizados testes com US manual, somente foram identificadas as descontinuidades cuidadosamente pelo operador com maior experiência. Um teste que poderia ser realizado seria identificar as inclusões somente pelo US manual, variando o ajuste e os operadores e avaliando a assertividade em um estudo de Análise do Sistema de Medição (MSA).

8.0 REFERÊNCIAS

AGUIAR S. **Integração das Ferramentas da Qualidade ao PDCA e ao Programa Seis Sigma**. INDG Tecnologia em Serviços LTDA, Minas Gerais, 2006.

ANDREUCCI R. **Ensaio por Ultrassom**. Associação brasileira de Ensaios Não Destrutivos e inspeção, São Paulo, 2008.

APOSTILA. **Ensaios Não Destrutivos Ultrassom Aspectos Básicos Nível 1**. Módulo TRE. Porto Alegre, 2001.

APOSTILA 2, ULTRASSOM NÍVEL 2 APOSTILA TEÓRICA. Fraend Consultoria, inspeção e treinamento, 2008.

APOSTILA DO PARTICIPANTE. **MAS Análise do Sistema de Medição 3ª Edição**. Setec, 2004.

MAS 3ª EDIÇÃO. **Análise dos Sistemas de Medição**. Daimler Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation, 2002

BERKE M. **Nondestructive Material Testing with Ultrasonics - Introduction to the Basic Principles**. 2000. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/v05n09/berke/berke1.htm#0>. Acesso em abril de 2009.

BIRKS A. S., GREEN R. E. Jr., McINTIRE P. **Nondestructive Testing Handbook**. American Society for Nondestructive Testing, Inc, Vol. 7, USA, 1991.

CENTRO DA QUALIDADE, SEGURANÇA E PRODUTIVIDADE PARA O BRASIL E AMERICA LATINA. **Introdução ao DOE – Utilizando o Minitab 14**. 2005.

BRANDALEZE. E. Proyecto de modificación de La morfologia de los sulfuros. Metalurgia: I+D, Asistencia Técnica, Capacitación y Eventos, AR, 2009.

GUIA DE END E INSPEÇÃO, **Guia de métodos**. Associação brasileira de Ensaios Não Destrutivos e inspeção, São Paulo, 2008.

McMASTER R. C. **Nondestructive Testing Handbook**, The Ronald Press Company, Vol. 2, New York, NY, 1963.

MIX P.E. **Introduction to Nondestructive Testing**. John Willey & Sons Inc., Austin, Texas, 2005.

NEPOMUCENO L.X. **Tecnologia Ultra-Sônica**. Editora Edgard Blücher LTDA, 1980.

OIKAWA K., OHTANI H., ISHIDA K., NISHIZAWA T. **The Control of the Morfology of MnS Inclusions in Steel During Solidification.** Graduate School, Tohoku University, Japan, 1995.

PUBLICAÇÃO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **Guia de END – Ensaio de Fundição.** Revista abende, São Paulo, 2008.

ROTONDARO, R. G. **Seis Sigma – Estratégia Gerencial para a Melhoria de Processos, Produtos e Serviços.** Editora Atlas, São Paulo, 2002.

SANTIN, J.L. **Ultrassom Técnica e Aplicação,** Quality Mark, Rio de Janeiro, 1996.

ULTRASONIC TESTING LEVEL II. Krautkramer Training System, Alemanha, 1998.

ANEXOS

Anexo 1 – Coleta de dados relativa aos Testes 30, 31 e 100 referente à condição com inclusão.

Descont	Método de calibração									Código	Referência	Condição
	30			31			100					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
2	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
3	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
4	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
5	R	R	R	R	R	R	R	R	A	B	R	Inclusão
6	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
7	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
8	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
9	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
10	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
11	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
12	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
13	R	R	R	A	R	R	R	R	R	B	R	Inclusão
14	A	A	A	R	R	A	R	A	R	B	R	Inclusão
15	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
16	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
17	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
18	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
19	R	R	A	R	A	R	R	A	A	B	R	Inclusão
20	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
21	R	A	R	R	R	R	R	R	R	B	R	Inclusão
22	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
23	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
24	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
25	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
26	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
27	R	R	A	R	R	R	R	R	R	B	R	Inclusão
28	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
29	R	R	R	R	R	R	R	R	A	B	R	Inclusão
30	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
31	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
32	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão

Anexo 2 – Coleta de dados relativa aos Testes 30, 31 e 100 referente à condição sem inclusão.

Descont	Método de calibração									Código	Referência	Condição
	30			31			100					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
33	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	A	S/ Inclusão
34	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	A	S/ Inclusão
35	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	A	S/ Inclusão
36	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	A	S/ Inclusão
37	R	R	A	R	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
38	R	R	A	R	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
39	R	R	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
40	R	R	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
41	A	R	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
42	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
43	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
44	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
45	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
46	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
47	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
48	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
49	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
50	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
51	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
52	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
53	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
54	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
55	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
56	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
57	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ Inclusão
58	A	A	A	A	A	A	R	R	A	B	A	S/ Inclusão
59	A	A	A	A	A	A	R	R	A	B	A	S/ Inclusão
60	A	A	A	A	A	A	R	R	A	B	A	S/ Inclusão
61	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
62	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
63	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
64	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
65	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
66	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
67	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
68	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
69	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
70	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
71	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
72	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
73	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
74	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
75	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
76	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
77	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
78	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
79	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão
80	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ Inclusão

Anexo 3 – Coleta de dados relativa aos Testes 31, 33 e 100 referente à condição com inclusão.

Descont	Método de ajuste									Código	Referência	Condição
	33			31			100					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
2	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
3	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
4	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
5	R	R	R	R	R	R	R	R	A	B	R	Inclusão
6	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
7	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
8	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
9	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
10	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
11	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
12	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
13	R	R	R	A	R	R	R	R	R	B	R	Inclusão
14	R	R	A	R	R	A	R	A	R	B	R	Inclusão
15	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
16	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
17	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
18	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
19	R	A	A	R	A	R	R	A	A	B	R	Inclusão
20	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
21	R	R	A	R	R	R	R	R	R	B	R	Inclusão
22	R	A	R	R	R	R	R	R	R	B	R	Inclusão
23	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
24	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
25	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
26	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
27	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
28	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
29	R	R	R	R	R	R	R	R	A	B	R	Inclusão
30	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
31	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão
32	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	R	Inclusão

Anexo 4 – Coleta de dados relativa aos Testes 31, 33 e 100 referente à condição sem inclusão.

Descont	Método de ajuste									Código	Referência	Condição
	33			31			100					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
33	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	A	S/ inclusão
34	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	A	S/ inclusão
35	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	A	S/ inclusão
36	R	R	R	R	R	R	R	R	R	C	A	S/ inclusão
37	R	R	R	R	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
38	R	R	R	R	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
39	R	R	R	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
40	R	R	R	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
41	R	R	R	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
42	A	A	R	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
43	A	A	R	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
44	A	A	R	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
45	A	A	R	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
46	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
47	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
48	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
49	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
50	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
51	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
52	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
53	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
54	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
55	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
56	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
57	A	A	A	A	A	A	R	R	R	B	A	S/ inclusão
58	A	A	A	A	A	A	R	R	A	B	A	S/ inclusão
59	A	A	A	A	A	A	R	R	A	B	A	S/ inclusão
60	A	A	A	A	A	A	R	R	A	B	A	S/ inclusão
61	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
62	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
63	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
64	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
65	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
66	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
67	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
68	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
69	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
70	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
71	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
72	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
73	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
74	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
75	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
76	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
77	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
78	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
79	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão
80	A	A	A	A	A	A	A	R	A	B	A	S/ inclusão