

TANCREDO LOBERTO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO ENSAIO DE ULTRA-SOM NA INSPEÇÃO DE
JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS AISI 316**

CURITIBA

2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

TANCREDO LOBERTO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO ENSAIO DE ULTRA-SOM NA INSPEÇÃO DE
JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS AISI 316**

Dissertação apresentada como requisito parcial a obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica pelo programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Orientadora: Prof^a. Karin Soldatelli Borsato. Dr^a Eng^a.

CURITIBA

2007

TANCREDO LOBERTO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO ENSAIO DE ULTRA-SOM NA INSPEÇÃO DE
JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS AISI 316**

Dissertação apresentada como requisito parcial a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na área de fabricação da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

Orientadora: _____

Professora Karin Soldatelli Borsato, Dr^a Eng^a.
Departamento de Engenharia Mecânica (PUC PR)

Professor João Antonio Palma Setti, Dr Eng.
Departamento de Engenharia Mecânica (PUC PR)

Professor Ramón Sigifredo Cortés Paredes, Dr Eng.
Departamento de Engenharia Mecânica (UFPR)

Professor Marcio Bacci da Silva, Dr Eng.
Departamento de Engenharia Mecânica (UFU)

Curitiba, 10 de Julho de 2007.

Dedico este trabalho aos meus pais,
a minha noiva Paula e ao meu irmão
Giuseppe, pelo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Elisabete, que sempre foi à estrutura, a direção e o rumo da minha vida.

Ao meu irmão Giuseppe, pela compreensão, carinho e grande amizade.

A minha noiva Paula, pelo carinho e enorme compreensão durante todo o Mestrado.

A Professora Karin Soldatelli Borsato, pelos ensinamentos e a forma objetiva em que conduziu toda a orientação deste trabalho.

Ao Professor Ricardo Diego Torres pelas inúmeras sugestões em todo o trabalho.

Ao Sr. César Lucio Molitz Allenstein, pela amizade, auxílio e orientação na execução de todos os ensaios mecânicos realizados neste trabalho.

A Engisa pela possibilidade de execução prática de toda esta pesquisa.

Aos colegas de Mestrado pela amizade e carinho durante todo o curso.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS | 11 |
| LISTA DE TABELAS | 15 |
| RESUMO | 16 |
| ABSTRACT | 17 |
| CAPÍTULO 1 | 18 |
| INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 Caracterização do problema | 19 |
| 1.2 Objetivos | 19 |
| 1.2.1 Objetivo geral | |
| 1.2.2 Objetivos específicos | |
| 1.3 Estrutura | 19 |
| CAPITULO 2 | 21 |
| REVISÃO DA LITERATURA | 21 |
| 2.1 Ensaio de ultra-som | 21 |
| 2.1.1 Finalidade do ensaio e princípios básicos | 21 |
| 2.1.2 Tipos de ondas ultra-sônicas | 22 |
| a) Ondas longitudinais | 22 |
| b) Ondas transversais | 23 |
| c) Ondas superficiais | 25 |
| 2.1.3 Comportamento da ondas sônicas | 26 |
| 2.1.4 Definições básicas e relações importantes | 27 |
| a) Velocidade de propagação do som | 27 |
| b) Comprimento de onda | 28 |
| c) Relações: frequência, velocidade e comprimento de onda | 29 |

| | |
|---|-----------|
| 2.1.5 Definições básicas em relação aos ângulos de incidência | 30 |
| a) Ângulo de incidência normal | 30 |
| b) Ângulo de incidência oblíqua | 31 |
| 2.1.6 Nível de intensidade sonora | 32 |
| 2.1.7 Propagação das ondas acústicas nos materiais metálicos e a geometria do feixe sônico | 33 |
| 2.1.8 Geração das ondas ultra-sônicas | 34 |
| a) Efeito piezoelétrico | 34 |
| b) Tipos de cristais piezoelétricos utilizados no ultra-som industrial | 35 |
| 2.1.9 Transdutores normais ou retos | 37 |
| 2.1.10 Transdutores angulares | 38 |
| 2.1.11 Transdutores duplo-cristal ou SE | 39 |
| 2.1.12 Acoplantes | 39 |
| 2.1.13 Técnicas de inspeção por ultra-som | 40 |
| a) Técnica impulso-eco ou pulso-eco | 41 |
| b) Técnica da transparência | 41 |
| 2.1.14 Atenuação do feixe sônico | 42 |
| a) Divergência do feixe sônico | 43 |
| 2.2 Aços inoxidáveis | 44 |
| 2.2.1 Aços inoxidáveis ferríticos | 47 |
| 2.2.2 Aços inoxidáveis duplex | 47 |
| 2.2.3 Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação | 48 |
| 2.2.4 Aços inoxidáveis martensíticos | 48 |
| 2.2.5 Aços inoxidáveis austeníticos | 48 |
| 2.2.5.1 Propriedades mecânicas | 49 |
| 2.2.5.2 Metalurgia da soldagem | 49 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2.5.3 Efeitos dos elementos de liga sobre as características dos aços inoxidáveis austeníticos | 50 |
| 2.2.5.4 A ferrita “ δ ” nos aços inoxidáveis austeníticos | 52 |
| 2.2.5.5 Sequências de solidificação das ligas inoxidáveis austeníticas | 53 |
| 2.2.5.6 Determinação dos teores de ferrita “ δ ”(técnicas de medição) | 55 |
| 2.3 Gamagrafia industrial | 56 |
| 2.3.1 Fontes emissoras de radiação | 56 |
| 2.3.2 Equipamentos de gamagrafia industrial | 57 |
| 2.3.3 Tipos de filmes radiográficos | 58 |
| 2.3.4 Determinação da sensibilidade da imagem radiográfica | 60 |
| CAPITULO 3 | 61 |
| MATERIAL E MÉTODOS | 61 |
| 3.1 Elaboração do procedimento de execução do ensaio de ultra-som | 61 |
| 3.2 Fabricação dos blocos de calibração e referência para realização do ensaio | 61 |
| 3.2.1 Bloco de calibração do aparelho | 61 |
| 3.2.2 Bloco de referência utilizado para traçagem das curvas de referência de cada cabeçote utilizado | 62 |
| 3.3 Seleção dos equipamentos necessários para realização do ensaio | 64 |
| 3.3.1 Aparelho de ultra-som industrial..... | 64 |
| 3.3.2 Cabeçotes utilizados para realização do ensaio | 66 |
| 3.3.2.1 Frequência dos cabeçotes de ultra-som utilizados | 66 |
| 3.3.2.2 Tipos de incidência das ondas ultra-sônicas | 66 |
| 3.3.2.3 Espessura dos corpos de prova que serão ensaiados | 68 |
| 3.3.2.4 Acoplante utilizado para realização do ensaio | 68 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4 Seleção dos corpos de prova | 68 |
| 3.5 Propriedades mecânicas dos corpos de prova..... | 69 |
| 3.6 Determinação das curvas de referência para cada cabeçote de ultra som utilizado | 70 |
| 3.7 Realização do ensaio de ultra-som | 70 |
| 3.8 Realização do ensaio de gamagrafia | 71 |
| CAPITULO 4 | 73 |
| RESULTADOS | 73 |
| 4.1 Propriedades mecânicas dos corpos de prova | 73 |
| 4.1.1 Resultados da composição química dos corpos de prova | 73 |
| 4.1.2 Resultados da composição química do depósito de solda efetuado | 73 |
| 4.1.3 Resultados da medição de ferrita “ δ ” nos depósitos de solda | 74 |
| 4.1.3.1 Medição realizada com aparelho ferritoscópio | 74 |
| 4.1.3.2 Determinação do número de ferrita (FN) segundo Delong | 74 |
| 4.2 Curvas de referência obtidas para cada cabeçote utilizado | 75 |
| 4.2.1 Cabeçote duplo-cristal | 76 |
| 4.2.2 Cabeçote angular de 45° | 77 |
| 4.2.3 Cabeçote angular de 60° | 78 |
| 4.2.4 Cabeçote angular de 70° | 79 |
| 4.3 Resultados obtidos na execução do ensaio de ultra-som | 80 |
| 4.3.1 Cabeçote duplo-cristal | 80 |
| 4.3.2 Cabeçote angular de 45° | 82 |
| 4.3.3 Cabeçote angular de 60° | 85 |
| 4.3.4 Cabeçote angular de 70° | 87 |
| 4.4 Resultados obtidos no ensaio de gamagrafia | 89 |
| 4.5 Comparação dos resultados obtidos no ensaio de ultra-som e gamagrafia | 92 |

| | |
|---|-----------|
| CAPITULO 5 | 93 |
| CONCLUSÕES | 93 |
| CAPITULO 6 | 95 |
| SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 95 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 96 |
| APENDICE 1 – Procedimento de execução do ensaio de ultra-som em juntas soldadas de topo do aço AISI 316 | 98 |
| APENDICE 2 – Especificação de procedimento de soldagem utilizado para fabricação dos corpos de prova | 117 |
| APENDICE 3 – Imagens radiográficas obtidas no ensaio de gamagrafia realizados nos corpos de prova | 120 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Campo de audibilidade das vibrações mecânicas | 22 |
| Figura 2 – Propagação de onda longitudinal em um corpo de massa | 23 |
| Figura 3 – Propagação de uma onda transversal em um corpo de massa | 24 |
| Figura 4 – Demonstração do comprimento de onda sônica | 28 |
| Figura 5 – Classificação teórica das zonas do campo sônico | 33 |
| Figura 6 – Aspecto construtivo do cabeçote normal ou reto | 37 |
| Figura 7 – Aspecto construtivo do cabeçote angular | 38 |
| Figura 8 – Aspecto construtivo do cabeçote duplo-cristal | 39 |
| Figura 9 – Técnica Impulso-eco | 41 |
| Figura 10 – Técnica da transparência | 41 |
| Figura 11 – Variação da sensibilidade de detecção em função da divergência | 44 |
| Figura 12 - Modificações na composição química do aço AISI 304 visando obter propriedades especiais | 45 |
| Figura 13 - Seção vertical de um diagrama Fé-Cr-Ni pseudo binário, para um teor de Fé de 70% em peso | 53 |
| Figura 14 - Exemplos de morfologias de ferrita “ δ ” na zona fundida de aços inoxidáveis austeníticos | 55 |
| Figura 15 – Irradiador de uma fonte radioativa de Irídio 192 | 57 |
| Figura 16 – Tubo guia – equipamento responsável por direcionar a fonte ao local da exposição | 57 |
| Figura 17 – Cabo de comando – responsável em expor a fonte de radiação | 58 |
| Figura 18 – Exemplos de defeitos (porosidade) de soldagem apresentados em uma imagem radiográfica | 59 |
| Figura 19 – Exemplos de defeitos (porosidade) de soldagem apresentados em uma imagem radiográfica | 59 |
| Figura 20 – Exemplos de defeitos (concavidade) de soldagem apresentados em uma imagem radiográfica | 59 |
| Figura 21 – Exemplos de defeitos (trincas) de soldagem apresentados em uma imagem radiográfica | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 22 – Exemplos de defeitos (falta de penetração) de soldagem apresentados em uma imagem radiográfica | 60 |
| Figura 23 – Exemplos de defeitos (porosidade isolada) de soldagem apresentados em uma imagem radiográfica | 60 |
| Figura 24 – Aspecto do bloco V1 utilizado para calibração da escala Horizontal do aparelho | 62 |
| Figura 25 – Bloco V1 fabricado no material AISI 316 | 62 |
| Figura 26 – Aspecto do bloco de referência utilizado para determinação das curvas de referência para cada cabeçote utilizado | 63 |
| Figura 27 – Aspecto do bloco de referência utilizado para determinação das curvas de referência para cada cabeçote utilizado | 63 |
| Figura 28 – Detalhe dos furos Ø 2,4 mm realizados ao longo da espessura do bloco de referência | 64 |
| Figura 29 – Aparelho de ultra-som marca Krautkramer – Modelo USM II | 65 |
| Figura 30 – Funções do aparelho de ultra-som marca Krautkramer modelo USM II | 65 |
| Figura 31 – Vista superior do cabeçote de ultra-som duplo-cristal marca Krautkramer numero de série 574621594 | 67 |
| Figura 32 – Vista frontal do cabeçote de ultra-som duplo-cristal marca Krautkramer numero de série 574621594 | 67 |
| Figura 33 – Vista superior do cabeçote angular de 45° marca Krautkramer numero de série 5690707266 | 67 |
| Figura 34 – Vista frontal do cabeçote angular de 45° marca Krautkramer numero de série 5690707266 | 67 |
| Figura 35 – Vista superior do cabeçote angular de 60° marca krautkramer numero de série 06092 | 67 |
| Figura 36 – Vista frontal do cabeçote angular de 60° marca Krautkramer numero de série 06092 | 67 |
| Figura 37 – Vista superior do cabeçote angular de 70° marca Krautkramer numero de série 3692009206 | 68 |
| Figura 38 – Vista frontal do cabeçote angular de 70° marca Krautkramer numero de série 3692009206 | 68 |
| Figura 39 - Espectrômetro de emissão óptica marca Bird | 69 |
| Figura 40 – Ferritoscópio Ecolmeter utilizado para medição da ferrita delta .. | 70 |

| | |
|--|----|
| Figura 41 - Aspecto do irradiador utilizado para execução do ensaio de gamagrafia nos corpos de prova | 71 |
| Figura 42 – Modelo de indicador de qualidade de imagem utilizado na gamagrafia industrial | 72 |
| Figura 43 – Medição da ferrita delta ao longo do cordão do corpo de prova . | 74 |
| Figura 44 – Diagrama de Delong | 75 |
| Figura 45 – Curva de referência para inspeção dos corpos de prova através do cabeçote duplo-cristal MSEB 4 com freqüência de 4 MHZ | 76 |
| Figura 46 - Curva de referência para inspeção dos corpos de prova através do cabeçote angular de 45° MWB 45-4 com freqüência de 4 MHZ | 77 |
| Figura 47 - Curva de referência para inspeção dos corpos de prova através do cabeçote angular de 60° MWB 60-4 com freqüência de 4 MHZ | 78 |
| Figura 48 - Curva de referência para inspeção dos corpos de prova através do cabeçote angular de 70° MWB 70-4 com freqüência de 4 MHZ | 79 |
| Figura 49 – Realização do ensaio de ultra-som utilizando o cabeçote duplo cristal com freqüência de 4 Mhz com movimentação sobre o reforço de solda | 81 |
| Figura 50 – Demonstração dos ecos provenientes da realização do ensaio nos 3 corpos de prova utilizando o cabeçote duplo-cristal. Resultado obtido na tela do aparelho. Localização do 1° eco de reflexão com percurso sônico de 10 mm referente a espessura do corpo de prova ensaiado | 82 |
| Figura 51 – Realização do ensaio de ultra-som utilizando o cabeçote angular de 45° com freqüência de 4 Mhz. Movimentação sobre o metal de base | 83 |
| Figura 52 – Comportamento do feixe sônico para os corpos de prova analisados com o cabeçote de 45° | 85 |
| Figura 53 – Demonstração dos ecos provenientes da realização do ensaio nos 3 corpos de prova utilizando o cabeçote angular de 45° . Resultado obtido na tela do aparelho. Localização do 1° eco de reflexão com percurso sônico de 14,14 mm referente a espessura do corpo de prova ensaiado | 84 |
| Figura 54 – Realização do ensaio de ultra-som com o cabeçote angular de 60° | 85 |
| Figura 55 – Comportamento do feixe sônico do cabeçote de 60° nos corpos de prova avaliados. Percurso sônico igual a 20,0 mm | 86 |

| | |
|---|----|
| Figura 56 - Demonstração dos ecos provenientes da realização do ensaio nos 3 corpos de prova utilizando o cabeçote angular de 60°. Resultado obtido na tela do aparelho. Localização do 1º eco de reflexão com percurso sônico de 20,0 mm referente a espessura do corpo de prova ensaiado | 86 |
| Figura 57 – Realização do ensaio de ultra-som com o cabeçote angular de 70° | 87 |
| Figura 58 – Comportamento do feixe sônico do cabeçote de 70° nos corpos de prova avaliados. Percurso sônico igual a 29,23 mm | 88 |
| Figura 59 - Demonstração dos ecos provenientes da realização do ensaio nos 3 corpos de prova utilizando o cabeçote angular de 70°. Resultado obtido na tela do aparelho. Localização do 1º eco de reflexão com percurso sônico de 29,23 mm referente a espessura do corpo de prova ensaiado | 88 |
| Figura 60 – Marcação realizada nos corpos de prova para facilitar a localização de possíveis defeitos | 89 |
| Figura 61 – Imagem radiográfica obtida no corpo de prova 01 | 90 |
| Figura 62 – Localização dos defeitos de soldagem encontrados no corpo de prova 01 | 90 |
| Figura 63- Imagem radiográfica obtida no corpo de prova 02 | 91 |
| Figura 64 – Localização dos defeitos de soldagem encontrados no corpo de prova 02 | 91 |
| Figura 65 – Imagem radiográfica obtida no corpo de prova 03 | 92 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Valores de impedância acústica para alguns tipos de materiais | 27 |
| Tabela 2 – Velocidade de propagação do som – ondas longitudinais e transversais | 28 |
| Tabela 3 – Relação velocidade longitudinal x frequência x comprimento de onda em relação ao menor defeito que pode ser detectado no exame ultrassônico realizado no aço inoxidável | 29 |
| Tabela 4 - Relação velocidade transversal x frequência x comprimento de onda em relação ao menor defeito que pode ser detectado no exame ultrassônico realizado no aço inoxidável | 30 |
| Tabela 5 – Propriedades físicas dos cristais piezoelétricos utilizados no ensaio de ultra-som | 36 |
| Tabela 6 – Impedância acústica de alguns materiais e acoplantes | 40 |
| Tabela 7 – Valores de atenuação sônica em materiais aço Cr-Ni obtidos em três diferentes processos de fabricação | 42 |
| Tabela 8 – Valores de “k” em função da redução da intensidade sônica | 43 |
| Tabela 9 – Efeitos dos elementos de liga nos aços inoxidáveis austeníticos | 51 |
| Tabela 10 – Composição química das chapas dos corpos de prova utilizados | 73 |
| Tabela 11 – Composição química dos depósitos de solda efetuados nos corpos de prova utilizados | 73 |

RESUMO

No intuito de melhorar o controle de qualidade dos processos de fabricação atualmente utilizados na indústria e atender as novas exigências de qualidade impostas pelo mercado, diversas técnicas de ensaios não destrutivos foram criadas. Porém o mercado ainda não dispõe de técnicas de análise por ultra-som em peças de aço inoxidáveis e poucas literaturas tratam do tema.

O presente trabalho visa estudar a viabilidade da execução do ensaio de ultra-som convencional na inspeção de juntas soldadas de topo no aço inoxidável AISI 316. Todo o estudo será baseado na criação de um procedimento de trabalho baseado nos requisitos estabelecidos no código ASME (American Society of Mechanical Engineers).

O procedimento de ultra-som será elaborado conforme requisitos do código ASME V.

A avaliação das juntas soldadas será realizada conforme requisitos contidos no código ASME VIII Divisão 1.

Os resultados obtidos no ensaio de ultra-som serão comparados com os resultados obtidos no ensaio de gamagrafia industrial, objetivando verificar se o método criado atende aos objetivos e requisitos normativos.

Fornecendo, futuramente, se viável, suporte técnico aos atuais métodos de controle de qualidade e auxiliando o desenvolvimento de novas tecnologias que possam preencher uma lacuna existente nesta área cada vez mais exigente.

Palavras-chave: juntas soldadas, aço inoxidáveis austeníticos, ultra-som.

ABSTRACT

In the intuit of to improve the control of quality of the production processes now used in the industry and to assist the new quality demands imposed by the market, several techniques of non destructive testing were created. Even so the market doesn't still have analysis techniques for ultra-sound in stainless steel pieces and little literatures are about the theme.

The present work aims to study the viability of the execution of the rehearsal of conventional ultrasonic testing in the inspection of welding in stainless steel AISI 316. The whole study will be based on the creation of a work procedure based on the requirements established in the code ASME (American Society of Mechanical Engineers).

The ultrasonic testing procedure will be elaborated according to requirements of the code ASME V.

The evaluation of the welded committees will be accomplished according to requirements contained in the code ASME VIII Division 1.

The results obtained in the ultra-sound rehearsal will be compared with the results obtained in the rehearsal of industrial gamma-ray, objectifying to verify the method servant assists to the objectives and normative requirements.

Supplying, futuring, technical support to the current methods of quality control and aiding the development of new technologies that you they can fill an existent lacuna lives and in this area demanding it lives.

Key-words: welding, stainless steel, ultrasonic testing.

1. Introdução

O método convencional de ensaio por ultra-som em juntas soldadas de aços inoxidáveis austeníticos é muito pouco utilizado atualmente na indústria em função de suas limitações práticas. A escassez de bibliografias existentes impossibilita um melhor entendimento da não utilização deste ensaio na inspeção de juntas soldadas destes tipos de materiais.

Vários são os fenômenos físicos que envolvem o ensaio por ultra-som industrial e sua complexidade e dificuldades de avaliação o tornam o ensaio não destrutivo convencional mais complexo utilizado atualmente na indústria.

Em função da falta de conhecimento prático das limitações do ensaio na inspeção de juntas soldadas de materiais inoxidáveis austeníticos, muitas vezes são utilizados outros tipos de ensaios como a radiografia industrial para a aceitação de juntas soldadas de equipamentos que operem com maiores requisitos de segurança.

O termo confiabilidade, quando aplicado a um determinado procedimento de inspeção, exprime quantitativamente a eficiência deste ensaio na detecção e avaliação de descontinuidades ou defeitos onde vários parâmetros devem ser levados em consideração.

Em outras palavras, quando utilizamos um determinado procedimento de inspeção em determinada aplicação industrial, buscamos a criação de uma rotina de trabalho baseada em normas técnicas aplicáveis e que gerem meios de trabalho que permitam garantir que o ensaio executado atenda aos objetivos para o qual foi criado e estabelecido.

O presente trabalho procura esclarecer questões relativas a aplicação do ensaio de ultra-som em juntas soldadas de materiais inoxidáveis austeníticos, buscando definir uma metodologia, procedimento de inspeção, que possibilite o estudo da viabilidade da execução do ensaio de ultra-som na inspeção do aço AISI 316.

O conhecimento destes requisitos práticos de execução e das formas de avaliação baseado em normas técnicas é de suma importância para um melhor entendimento dos profissionais da área e para confiabilidade dos processos de fabricação na área de soldagem.

Toda esta metodologia necessária para o estudo será baseada nos requisitos da ASME (American Society of Mechanical Engineers).

1.1 Caracterização do Problema

Estudar a viabilidade da execução do ensaio de ultra-som industrial na inspeção de chapas soldadas do aço inoxidável austenítico AISI 316.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

Verificar a possibilidade de utilização e determinar o procedimento do ensaio de ultra-som convencional nas juntas soldadas de materiais do tipo AISI 316.

1.2.2 Objetivos específicos

Estabelecer e analisar, sob todos os requisitos técnicos necessários a execução do ensaio de ultra-som. Definir uma metodologia que permita a execução do ensaio em juntas soldadas de materiais inoxidáveis austeníticos através do método convencional e realizar a avaliação específica da aprovação do método na inspeção das juntas soldadas do aço AISI 316.

1.3 Estrutura

A presente dissertação está estruturada da seguinte forma:

No primeiro capítulo estão abordados a introdução, a formulação do problema, os objetivos e a estrutura deste trabalho.

No segundo capítulo têm-se uma revisão da literatura.

No terceiro capítulo estão descritas todas as metodologias utilizadas no trabalho assim como todos os materiais necessários para o desenvolvimento da pesquisa. Este capítulo faz uma abordagem da seleção das amostras, dos materiais utilizados para execução dos ensaios, a especificação do procedimento de soldagem utilizado, a caracterização das juntas soldadas avaliadas, o procedimento utilizado para calibração e determinação da sensibilidade do ensaio, assim como o método comparativo utilizado para posterior análise dos resultados obtidos.

No capítulo 4 estão descritos todos os resultados obtidos durante a execução dos experimentos.

No capítulo 5 e 6 respectivamente, estão expostas as conclusões do presente trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Ensaio de Ultra-som

2.1.1 Finalidade do Ensaio e Princípios Básicos

O ensaio de ultra-som é um método de ensaio não destrutivo que objetiva a detecção de descontinuidades ou defeitos internos presentes nos mais variados tipos de materiais, principalmente em aços. [1]

Os defeitos estão relacionados com os processos de fabricação utilizados na construção de peças e equipamentos e sua análise e interpretação por meio do ultra-som está diretamente ligada aos parâmetros utilizados no ensaio. [1]

Portanto o exame ultra-sônico, assim como todo exame não destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de responsabilidade. [2]

O ensaio por ultra-som é realizado com a utilização de ondas mecânicas ou acústicas inseridas no meio de inspeção. Qualquer onda mecânica é composta de oscilações de partículas discretas no meio em que se propaga onde a passagem de energia acústicas no meio em estudo faz com que as partículas que compõem o mesmo executem movimentos de oscilação em torno da posição de equilíbrio. [3]

Assim como uma onda sonora reflete ao incidir em um anteparo qualquer, a vibração ou onda ultra-sônica ao percorrer um meio elástico, refletirá da mesma forma, ao incidir em uma descontinuidade ou defeito a este meio considerado. Através de aparelhos apropriados, denominados aparelhos de ultra-som, detectamos as reflexões provenientes do meio avaliado, localizando, dimensionando e interpretando as descontinuidades. [4]

O número de vibração das partículas na unidade de tempo, frequência, informa se é gerado som audível ou ultra-som. A frequência do som audível permanece abaixo de 20.000 Hz, e o ultra-som está acima deste valor. A figura 1 mostra o campo de audibilidade das vibrações mecânicas. [1]

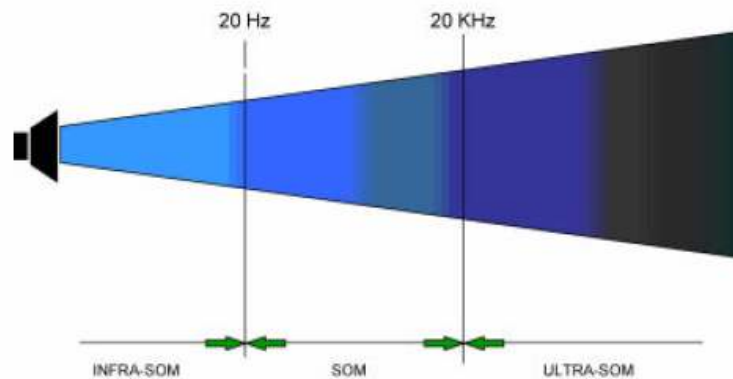


Figura 1: Campo de audibilidade das vibrações mecânicas. [1]

Assumindo que o meio em estudo é elástico, ou seja, as partículas que o compõem são rigidamente ligadas, mas podem oscilar em qualquer direção, então as ondas acústicas podem ser classificadas em quatro tipos: [3]

- Ondas longitudinais (ondas de compressão);
- Ondas transversais (ondas de cisalhamento);
- Ondas Superficiais (ondas de Rayleigh);
- Ondas Superficiais (ondas de Lamb).

2.1.2 Tipos de Ondas Ultra-sônicas

a) Ondas Longitudinais (ondas de compressão)

Uma onda longitudinal é obtida quando em um corpo de ensaio as partículas de massa próximas à superfície são impulsionadas perpendicularmente à mesma. O primeiro plano de partículas é defletido e transfere sua energia cinética para os próximos planos de partículas. Se as interligações de todas as partículas forem positivas, todos os planos seriam defletidos ao mesmo tempo, isto é, seus movimentos estariam em fases iguais [3]. Entretanto, desde que as partículas de massa estão interligadas elasticamente, os próximos planos de partículas de massa ficarão retardados. A figura 2 mostra a propagação da onda longitudinal em um corpo de massa. [1]

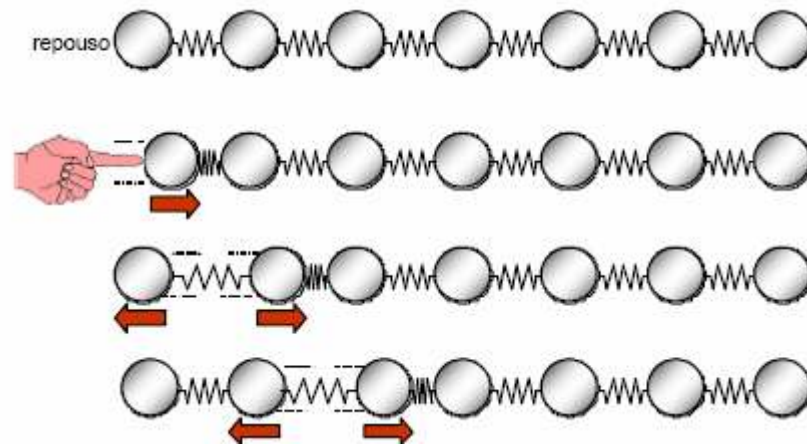


Figura 2: Propagação de onda longitudinal em um corpo de massa [1]

A distâncias iguais existe compressão de planos e partículas de massa. Entre eles, encontram-se zonas diluídas com grandes distâncias entre os planos de partículas. Elas são designadas com o comprimento de onda " λ " (lambda) da onda longitudinal. As zonas de compressão e de diluição movem-se através do corpo de prova com certa velocidade " V ", denominada velocidade da onda longitudinal. [2]

Esta velocidade do som é uma constante de cada material, isto é, ela difere de acordo com o material no qual a onda propaga. Assim ela pode ser considerada constante em um material homogêneo. Para o aço, água, ar e alumínio as velocidades das ondas longitudinais são: [2]

- Velocidade no aço: 5900 m/s;
- Velocidade na água: 1480 m/s
- Velocidade no ar: 330 m/s
- Velocidade no alumínio: 6300 m/s

Observando os movimentos de uma onda existe, além do comprimento de onda e a velocidade do som, um elemento mais interessante: a frequência.

A frequência indica o número de vibrações por segundo efetuado por cada partícula de massa. A escolha da frequência adequada é de fundamental importância para o sucesso do ensaio por ultra-som como será discutido no item 2.1.4 do trabalho.

b) Ondas Transversais (ondas de compressão)

Uma onda transversal é gerada quando as partículas de massa próximas à superfície são impulsionadas em uma direção paralela a superfície.

São geradas quando as partículas próximas a superfície são acionadas na direção paralela a esta superfície. Quando o primeiro plano se desloca, ele arrasta, pela interação elástica, o plano adjacente, e assim por diante, criando vales e cristas nos pontos laterais. Neste caso, os planos das partículas mantêm-se eqüidistantes, movimentando-se lateralmente com ação cisalhante entre eles, como ilustrado na figura 3. [1]

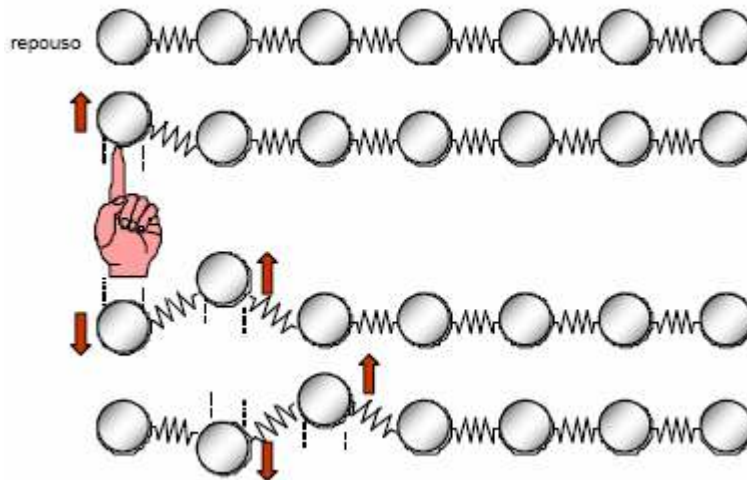


Figura 3: Propagação de onda transversal em um corpo de massa [1]

Observando-se o movimento dinâmico das ondas se verifica que o pico da onda bem como o seu vale permanece a uma distância constante durante o seu movimento através do corpo de ensaio. [2]

Analogicamente, para as condições das ondas longitudinais, a distância entre dois vales ou dois picos de ondas consecutivas é o comprimento de onda da onda transversal. [2]

A velocidade com o qual o pico e o vale de uma onda movem-se através do corpo é a velocidade da onda transversal. [2]

Da mesma forma como ocorrem nas ondas longitudinais, a velocidade das ondas transversais é uma constante do material, porém em todos os meios as velocidades das ondas transversais e longitudinais diferem largamente. [2]

As velocidades para as ondas transversais no aço, água, ar e alumínio são: [2]

- Velocidade no aço: 3230 m/s;
- Velocidade na água: 0 m/s
- Velocidade no ar: 0 m/s

- Velocidade no alumínio: 3130 m/s

A frequência outra vez indica o número de vibrações por segundo, feito pelas partículas de massa.

A razão pela qual a velocidade das ondas transversais é igual a zero na água e no ar deve-se ao fato de que este tipo de onda não se propaga nestes meios, ou seja, as forças de impulsão das ondas de cisalhamento devem ser transferidas, o que é impossível nos líquidos e gases. [2]

Conhecendo-se dois tipos de ondas mais importantes é possível obter um melhor entendimento sobre a geração das ondas ultra-sônicas conforme abordagem realizada no item 2.1.8.

c) Ondas superficiais (Ondas de Rayleigh e Ondas de Lamb)

São caracterizadas, e assim chamadas, devido ao movimento ao longo da interface entre um corpo sólido e um gás (ar). São utilizadas para detecção e avaliação de descontinuidades superficiais presentes no material ensaiado devido ao pequeno alcance que está diretamente relacionado com a qualidade da superfície da peça. [2]

Devido ao complexo movimento oscilatório das partículas da superfície, a velocidade de propagação da onda superficial é de aproximadamente 10% inferior ao valor da onda transversal. [2]

Ambas as ondas são utilizadas para inspeção de finas camadas de material que recobrem outros materiais, porém as ondas de “Lamb” possuem a particularidade de se propagarem com comprimento de onda próximo a espessura da chapa ensaiada. [2]

As ondas superficiais são raramente utilizadas na inspeção por ultra-som em peças e não serão abordadas neste trabalho em função da não utilização nos ensaios que serão realizados.

2.1.3 Comportamento das ondas sônicas

Quando introduzimos uma onda ultra-sônica em um determinado material e esta onda atinge uma interface com um segundo material, parte da energia acústica é refletida de volta ao primeiro meio e a energia restante é transmitida para o segundo meio. [4]

O fator determinante para se obter a relação entre a energia refletida e a energia transmitida é a impedância acústica dos materiais que compõem esta interface. A porcentagem da energia acústica incidente que será refletida pela interface depende da razão entre impedâncias acústicas e do ângulo de incidência. A impedância acústica de um material é definida como o produto da massa específica pela velocidade sônica do material, conforme fórmula abaixo [4]:

$$Z = \rho \times V \quad [1]$$

Onde:

Z = impedância acústica (kg / m²s)

P = massa específica (kg/m³)

V = velocidade do som (m/s)

As propriedades acústicas dos metais e ligas são influenciadas por variações na estrutura e condições metalúrgicas. Conseqüentemente, para uma determinada peça, as propriedades podem ser diferentes dos valores conhecidos na bibliografia. [4]

A tabela 1 mostra os valores de impedância acústica de alguns tipos de materiais.

Tabela 1: Valores de Impedância Acústica para alguns tipos de materiais [2]

| Material | Impedância Acústica x 10⁶ (kg/m²s) |
|----------------------------|---|
| Alumínio | 17064 |
| Cobre | 41830 |
| Ouro | 1514 |
| Aço | 46472 |
| Aço inoxidável austenítico | 44556 |
| Nylon | 2882 |
| Óleo automotivo | 1514 |
| Água | 1480 |
| Prata | 37800 |
| Titânio | 28284 |
| Níquel | 49544 |
| Acrílico | 3221 |
| Ferro fundido | 3657 |

2.1.4 Definições básicas e relações importantes

Velocidade de propagação do som

Definimos velocidade de propagação do som como sendo a distância percorrida pela onda sônica por unidade de tempo. A velocidade de propagação do som é uma característica do meio, sendo uma constante, independente da frequência. A tabela 2 mostra os valores de velocidades de propagação para ondas longitudinais e transversais em diferentes meios de propagação [3].

Tabela 2: Velocidade de propagação do som – Ondas Longitudinais e transversais
[3]

| Material | Velocidade (m/s) Ondas Longitudinais | Velocidade (m/s) Ondas Transversais |
|----------------------------|---|--|
| Ar | 330 | - |
| Alumínio | 6300 | 3100 |
| Cobre | 4700 | 2300 |
| Ouro | 3200 | 1200 |
| Aço | 5900 | 3200 |
| Aço inoxidável austenítico | 5800 | 3100 |
| Nylon | 2600 | 1100 |
| Óleo (SAE 30) | 1700 | - |
| Água | 1480 | - |
| Prata | 3600 | 1600 |
| Titânio | 6100 | 3100 |
| Níquel | 5600 | 3000 |
| Acrílico | 2700 | 1100 |
| Ferro fundido | 4800 | 2400 |

Comprimento de Onda

Comprimento de onda é a distância entre dois picos de ondas consecutivas e é expresso através da letra grega Lambda " λ ". A figura 4 mostra a representação do comprimento de onda. [4]

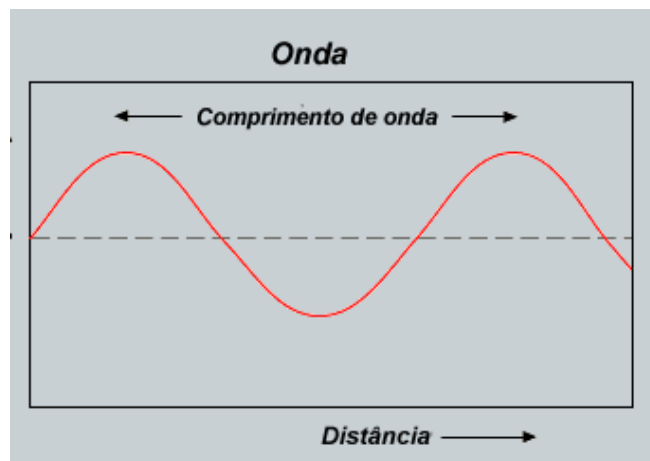


Figura 4 – Demonstração do comprimento de onda sônica [4]

Relações entre Frequência x Velocidade x Comprimento de onda

Considerando uma onda sônica se propagando num determinado material com velocidade “V”, frequência “f” e comprimento de onda “λ”, a correlação matemática dos três elementos pode ser definida como [1]:

$$V = f * \lambda \quad [2]$$

Onde: V = Velocidade do som (m /s)

F = Frequência (Hz)

λ = Comprimento de onda (m)

Como a velocidade do som é uma constante do material, a escolha de certa frequência define o comprimento de onda ultra-sônica. A faixa de frequência utilizada para aplicações industriais, compreende entre 1 MHz até 5 MHz. [2]

A frequência utilizada no ensaio ultra-sônico é de fundamental importância pois, está diretamente relacionada com o tamanho do defeito a ser detectado. Em geral, o menor diâmetro de uma descontinuidade a ser detectada no material deve ser da ordem de λ/2. Desta forma, é possível obter uma relação entre a frequência e o menor defeito a ser detectado no aço inoxidável [2]. As tabelas 3 e 4 mostram esta relação, considerando a propagação de ondas longitudinais e transversais.

Tabela 3 – Relação velocidade longitudinal x frequência x comprimento de onda em relação ao menor defeito que pode ser detectado no exame ultra-sônico realizado no aço inoxidável

| Velocidade Longitudinal (m/s) | Frequência (MHz) | Comprimento de onda λ (mm) | Menor defeito (mm) |
|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 5800 | 1 | 5,8 | 2,9 |
| 5800 | 2 | 2,9 | 1,45 |
| 5800 | 3 | 1,93 | 0,965 |
| 5800 | 4 | 1,45 | 0,725 |
| 5800 | 5 | 1,16 | 0,58 |

Tabela 4 – Relação velocidade transversal x freqüência x comprimento de onda em relação ao menor defeito que pode ser detectado no exame ultra-sônico realizado no aço inoxidável

| Velocidade Transversal (m/s) | Freqüência (MHz) | Comprimento de onda λ (mm) | Menor defeito (mm) |
|------------------------------|------------------|------------------------------------|--------------------|
| 3100 | 1 | 3,1 | 1,505 |
| 3100 | 2 | 1,505 | 0,7525 |
| 3100 | 3 | 1,033 | 0,5165 |
| 3100 | 4 | 0,775 | 0,3875 |
| 3100 | 5 | 0,62 | 0,31 |

2.1.5 Definições básicas em relação aos ângulos de incidência

Ângulo de incidência normal

Quando introduzimos no material uma onda sônica com um ângulo de incidência normal, igual a zero, o coeficiente de reflexão (R) que é a razão entre a intensidade do feixe incidente e a intensidade do feixe refletido, e o coeficiente de transmissão (T), obtido pela razão entre a intensidade do feixe incidente e a intensidade do feixe transmitido, podemos determinar qual é a razão, em porcentagens, expressar estas 2 (duas) equações da seguinte forma: [1]

$$R = I_r / I_i = (Z_2 - Z_1)^2 / (Z_2 + Z_1)^2 \quad [3]$$

$$T = I_t / I_i = 4(Z_2 \times Z_1) / (Z_2 + Z_1)^2 \quad [4]$$

Onde as siglas representam;

R = coeficiente de reflexão

T = coeficiente de transmissão

I_i = Intensidade do feixe incidente

I_r = Intensidade do feixe refletido

I_t = Intensidade do feixe transmitido

Z_1 = impedância acústica do meio 1 (kg / m²s)

Z_2 = impedância acústica do meio 2 (kg / m²s)

Como toda energia incidente é transformada em energia refletida e transmitida, o coeficiente pode ser obtidos pela relação $R + T = 1$. Os coeficientes são expressos em porcentagens. [2]

Desta forma, é possível calcular qual o coeficiente de reflexão e qual o coeficiente de transmissão obtidos em um ensaio por ultra-som com incidência normal do feixe sônico em material de aço inoxidável austenítico em que a segunda interface existente é o próprio acrílico existente no transdutor [2].

Os dados necessários para o cálculo são:

Z1 – Meio: Aço inoxidável austenítico – Valor: $44546 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Z2 – Meio: Acrílico (interface) – Valor: $3221 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Desta forma, teremos:

$$R = (44,5 - 3,221)^2 / (44,5 + 3,221)^2 = 1703,95 / 2277,29 = 0,748 = 74,8\%$$

Ou seja, em uma onda ultra-sônica incidida com ângulo normal em uma interface acrílico x aço inoxidável austenítico, 74,8% da onda é refletida e o restante, cerca de 25,17%, é transmitida ao terceiro meio, no caso o ar.

Ângulo de incidência oblíqua

Uma onda sônica incidida com ângulo diferente de zero, se comporta de maneira diferente, pois existe a mudança na direção do feixe sônico. Em qualquer ângulo de incidência diferente de zero existe o que é conhecido nas literaturas como conversão de modo, definida como mudança no tipo de oscilação ou tipo de onda. [4].

Além do fenômeno de conversão de modo existe também na incidência de feixes oblíquos o que chamamos de refração, que é definido como a mudança na direção de propagação.

As mudanças ocorridas na direção de propagação e no tipo de onda sônica dependem dos seguintes fatores: [4]

- Ângulo de incidência;
- Velocidade de propagação do som.

A lei que descreve o comportamento das ondas sônicas em interfaces é conhecida como lei de Snell. Embora originalmente concebida para ondas de luz, esta lei é aplicável às ondas sônicas, incluindo as ondas ultra-sônicas e outros tipos de onda. A lei de Snell é expressa da seguinte forma:

$$(\sin \alpha / \sin \beta) = (V_1 / V_2) \quad [5]$$

Sendo:

α = ângulo do feixe incidente

β = ângulo do feixe refletido ou refratado

V_1 = Velocidade do som no meio 1

V_2 = Velocidade do som no meio 2

2.1.6 Nível de intensidade sonora

O nível de intensidade sonora é uma grandeza que compara as intensidades de dois sons quaisquer e é representada pela letra "B" ("Bell"). Ela pode ser definida através da seguinte relação matemática [4]:

$$\text{N.I.S} = \log (I/I_0) \text{ B} \quad [6]$$

Onde I (intensidade final) e I_0 (intensidade inicial) são duas intensidades sonoras distintas medidas em Watts por centímetro quadrado (W / cm^2).

O Decibel equivale a 1/10 do "Bell" e em geral é normalmente utilizado para medidas de nível de intensidade sonora, e é definido pela seguinte relação: [3]

$$\text{N.I.S} = 10 \log (I/I_0) \text{ dB} \quad [7]$$

A teoria dos movimentos harmônicos na propagação ondulatória nos ensina que a intensidade de vibração é proporcional ao quadrado da amplitude sonora, e portanto podemos representar a Nível de Amplitude Sonora da seguinte forma: [3]

$$\text{N.A.S} = 10 \log [(A^2)/(A_0^2)] \text{ dB} \text{ ou } \text{N.A.S} = 20 \log (A/A_0) \text{ dB} \quad [8]$$

Onde:

A_0 - Amplitude Sonora Inicial

A – Amplitude Sonora Final

Esta relação pode ser entendida como sendo a comparação efetuada entre duas amplitudes de sinais, emitida e recebida pelo transdutor ultra-sônico, ou simplesmente conhecido como “Ganho” [2].

2.1.7 Propagação das ondas acústicas nos materiais metálicos e a geometria do feixe sônico.

Feixes sônicos incididos em materiais metálicos através de um cristal piezoelétrico, conhecido como emissor, apresentam as seguintes geometrias conforme demonstrado na figura 5. [1]

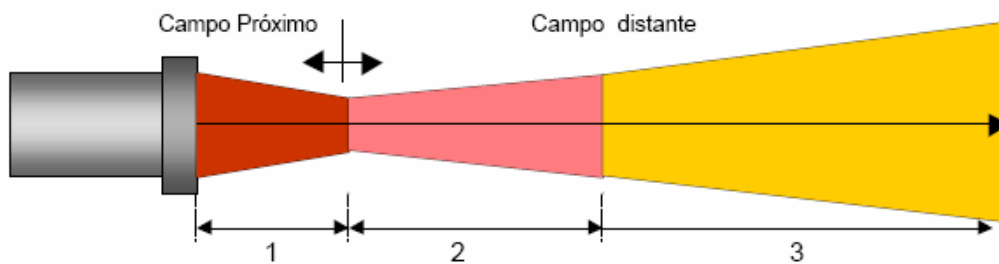


Figura 5 – Classificação teórica das zonas do campo sônico [1]

A região próxima ao cristal, simbolizada pela região 1 da figura 5, denomina-se campo próximo. Nesta região pequenas discontinuidades são difíceis de serem detectadas e avaliadas. É possível determinar a região do campo próximo através da seguinte equação matemática: [2]

$$N = (D_{ef}^2 / 4) * \lambda \text{ ou } N = (D_{ef}^2 * f) / (4 * v) \quad [9]$$

N = Campo próximo (mm)

F = Freqüência ultra-sônica (hz)

λ = comprimento de onda (mm)

V = velocidade de propagação do som (mm/s)

D_{ef} = Diâmetro efetivo do cristal (mm), onde:

$D_{ef} = 0,97 * \text{diâmetro do cristal (para cristais circulares)}$

$D_{ef} = 0,97 * \text{metade do comprimento do lado maior do cristal (para cristais retangulares)}$

A região do feixe sônico posterior ao campo próximo, simbolizada pelas regiões 2 e 3 da figura 4, é conhecida como campo distante ou campo longínquo. Nesta região a onda sônica diverge igual a um fecho de luz em relação ao eixo central e ainda diminui a intensidade de forma igual ao inverso do quadrado da distância. Esta região do feixe sônico é a mais recomendada para a detecção e avaliação de descontinuidades compatíveis com o comprimento de onda. [3]

2.1.8 Geração das Ondas-ultrasônicas

Ondas ultra-sônicas podem ser geradas e recebidas de diferentes maneiras:

[4]

- Efeito piezoelétrico;
- Choques e atritos mecânicos;
- Excitação térmica;
- Processos eletrostáticos;
- Processos eletrodinâmicos;
- Processos magnetostrictivos.

Entretanto, a maneira mais simples de geração de onda ultra-sônica é através do efeito piezoelétrico [2].

Efeito Piezoelétrico

O efeito piezoelétrico é baseado na característica que certos cristais possuem de gerar corrente elétrica quando deformados mecanicamente. [4]

As ondas ultra-sônicas introduzidas no material são geradas através destes cristais com variadas dimensões e formatos que vibram em uma determinada frequência. O efeito inverso também é verdadeiro e quando aplicamos dois eletrodos

sobre as faces opostas de um determinado cristal piezoelétrico, de maneira tal que seja possível carregar as faces eletricamente, o cristal comporta-se como se estivesse sobre pressão e diminui de espessura. [3].

O cristal piezoelétrico atua como um transdutor, ou seja, ele possui a capacidade de transformar energia elétrica em oscilação mecânica e da forma inversa transformar a energia mecânica em energia elétrica. Por possuir estas propriedades o cristal piezoelétrico pode ser utilizado como emissor e receptor das ondas ultra-sônicas. [1]

O cristal mais familiar na geração de ondas ultra-sônicas é o cristal de quartzo (SiO_2), que ocorre naturalmente na natureza na forma de prismas hexagonais com os extremos piramidais. [1]

Quando utilizamos uma placa fina de quartzo paralela ao plano cristalográfico do cristal, para gerar as ondas ultra-sônicas, e colocamos dois eletrodos e aplicamos uma voltagem DC a placa torna-se mais fina. [2]

Quando aplicamos uma voltagem AC, a espessura da placa oscila na frequência correspondente às alterações da voltagem. Se estas oscilações são introduzidas no corpo de ensaio, uma onda longitudinal é gerada. [2]

Tipos de Cristais Piezoelétricos utilizados no ultra-som industrial

Além do quartzo, outros cristais piezoelétricos são também usados como transdutores. Dentre eles podemos destacar:

- **sulfato de Lítio:** sensível a temperatura e pouco resistente, sua utilização no ensaio de ultra-som é limitada em função de sua temperatura de trabalho que não pode ser superior a 75°C . Este tipo de cristal é muito utilizado no ultra-som médico [2];
- **materiais cerâmicos polarizados:** obtidos artificialmente, os principais materiais cerâmicos polarizados utilizados como cristais piezoelétricos são: titanato de Bário, metaniobato de Chumbo e titanato zirconato de chumbo. [1]

Cada cristal piezoelétrico possui características próprias e apropriadas para cada finalidade.

O titanato de bário e o metaniobato de chumbo são os melhores emissores de energia sônica pois produzem ondas de grande energia, se comparadas com aquelas produzidas por cristais de quartzo. [2]

O titanato de bário é o cristal mais utilizado na inspeção industrial por apresentarem um excelente desempenho na inspeção convencional de forjados e juntas soldadas.

A Tabela 5 mostra algumas propriedades físicas dos cristais piezoelétricos utilizados no ensaio de ultra-som.

Tabela 5 – Propriedades físicas dos cristais piezoelétricos utilizados no ultra-som. [2]

| Propriedade | Quartzo | Sulfato de Lítio | Titanato de Bário | Metaniobato de Chumbo | Titanato Zirconato de Chumbo | Unidades |
|------------------------------------|---------|------------------|-------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------|
| Massa Específica | 2,65 | 2,06 | 5,4 | 6,2 | 7,5 | g/cm ³ |
| Velocidade Acústica | 5,74 | 5,46 | 5,10 | 3,30 | 4,00 | 10 ⁶ mm/s |
| Impedância Acústica | 15,3 | 11,2 | 27 | 20,5 | 30 | 10 ⁶ Kg/m2s |
| Temperatura Crítica | 576 | 15 | 120 | 550 | 190-350 | °C |
| Constante Dielétrica | 4,5 | 10,3 | 1000 | 300 | 400-4000 | |
| Coeficiente Acoplamento | 0,10 | 0,35 | 0,45 | 0,42 | 0,6-0,7 | |
| Módulo Piezoelétrico | 2,3 | 15 | 125-190 | 85 | 150-593 | 10 ⁻¹² m/V |
| Constante Deformação Piezoelétrica | 4,9 | 8,2 | 1,1 – 1,6 | 1,9 | 1,8 – 4,6 | 10 ⁹ V/m |
| Constante de Pressão Piezoelétrica | 57 | 156 | 14-21 | 32 | 20-40 | 10 ⁻³ Vm/N |

A frequência ultra-sônica gerada pelo cristal dependerá da sua espessura. Usualmente adota-se 1 mm para frequências de 4 MHz e 2 mm para frequências de 2 MHz. [4]

Todos os cristais utilizados são montados sobre uma base de suporte chamada de bloco amortecedor e junto com os eletrodos e a carcaça externa constituem o transdutor ou o cabeçote, nome mais usual utilizado. [4]

De uma forma usual, existem três tipos de transdutores que serão vistos a seguir: reto ou normal, angular e o duplo cristal.

2.1.9 Transdutores normais ou Retos

Os transdutores normais ou retos são assim chamados porque geram ondas ultra-sônicas que se propagam no material em direção retilínea. O cristal piezoelétrico é colado num bloco rígido denominado amortecedor e sua parte livre é protegida por uma membrana de borracha ou uma resina especial. [1]

O mesmo cristal piezoelétrico responsável em inserir as ondas ultra-sônicas no material em estudo tem a função de receber estas vibrações e transformá-la em sinais elétricos na tela do aparelho. [3]

Em geral os transdutores normais utilizados geram ondas longitudinais e são utilizados para inspeção de chapas, fundidos e forjados que apresentam descontinuidades na superfície perpendicular a superfície da peça. [2]

São construídos com cristais circulares com diâmetros de 5 a 24 mm e frequências de 0,5, 1,0, 2,0, 2,5, 5 e 6 MHz. Outros diâmetros e frequências existem, porém para aplicações industriais específicas. [3]

A figura 6 mostra o aspecto construtivo do transdutor normal.

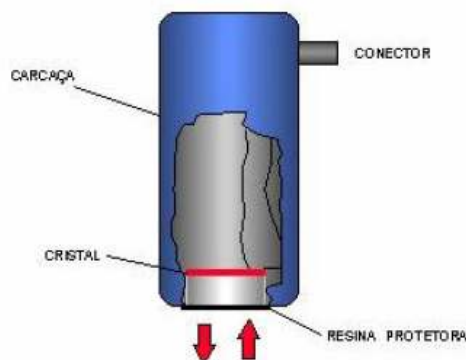


Figura 6 – Aspecto construtivo do cabeçote (transdutor) normal ou reto [1]

2.1.10 Transdutores angulares

Transdutores angulares são assim chamados porque geram ondas ultrassônicas que se propagam nos materiais de forma angular em relação a superfície da peça ensaiada. A direção angular é obtida através do posicionamento do cristal piezoelétrico de forma angular a superfície de contato do transdutor com a peça a ser ensaiada. [2]

A fixação do cristal é realizada através da colocação de uma cunha de plástico que funciona como amortecedor. Na prática os transdutores angulares mais usados na indústria atualmente possuem ângulos de 30° , 45° , 60° e 70° e sua escolha está associada a espessura do material em estudo [2].

O ângulo nominal sob o qual o feixe sônico penetra no material vale somente para inspeção de peças em aço. Caso a aplicação seja outra, deve-se calcular o ângulo real de penetração utilizando-se a lei de Snell. A mudança do ângulo deve-se a mudança de velocidade do meio de propagação [3].

De uma forma geral os cristais piezoelétricos utilizados nos transdutores angulares geram ondas longitudinais, entretanto quando esta onda passa da sapata acrílica para o material em ensaio (geralmente material metálico), ocorre a conversão de modo e a refração da onda, passando então a ser do tipo transversal. [4] Os cristais possuem geometria retangular que varia entre 8 x 9 mm até 15 x 20 mm. [3]

A figura 7 mostra o aspecto construtivo do transdutor angular.

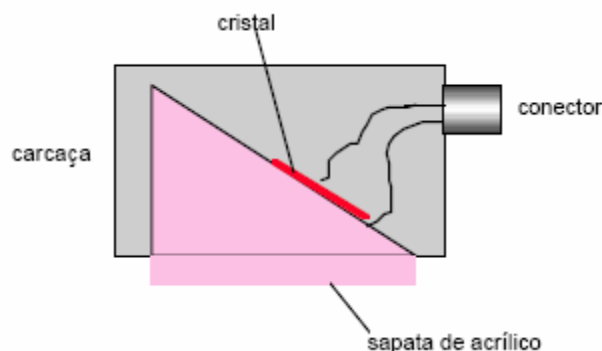


Figura 7 – Aspecto construtivo do transdutor (cabeçote) angular [1]

2.1.11 Transdutores duplo-cristal ou SE

Os transdutores duplo-cristal são assim chamados porque possuem dois cristais piezoelétricos em sua forma construtiva. Um cristal é responsável pela emissão do feixe sônico e o outro cristal é responsável em receptor a onda ultra-sônica em transformá-la em sinal elétrico na tela do aparelho. [4]

Por possuírem um feixe focalizado, são utilizados para medições de espessura, inspeção de peças de espessura reduzida ou quando se deseja detectar descontinuidades abaixo da superfície do material. [2]

Possuem uma faixa de inspeção ótima que varia em função das dimensões de cada cristal. Fora desta faixa de inspeção a sensibilidade se reduz e sua utilização não é recomendada. [3]

Os cristais são separados por um material acústico isolante levemente inclinados em relação a superfície de contato. Os cristais são montados sobre blocos de plástico especial de baixa atenuação. [1]

A figura 8 mostra o aspecto construtivo do transdutor duplo cristal.

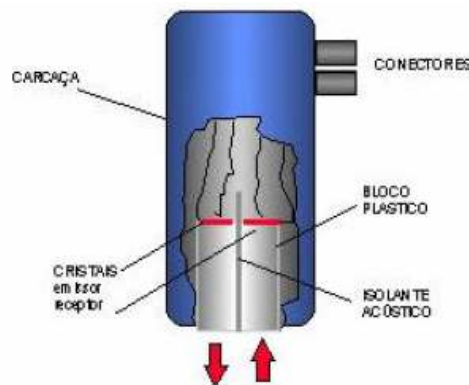


Figura 8 – Aspecto construtivo do transdutor (cabeçote) duplo-cristal [1]

2.1.12 Acoplantes

Os acoplantes utilizados no ensaio de ultra-som objetivam remover a camada de ar existente entre a superfície de contato (sapata) do cabeçote e a peça ensaiada. Esta camada de ar impede que as vibrações mecânicas produzidas pelo transdutor se propaguem para a peça em razão das características acústicas (impedância acústica) muito diferente do material a inspecionar. [1]

A impedância acústica é definida pelo produto da densidade do meio pela velocidade de propagação neste meio e representa a quantidade de energia acústica que se reflete e transmite para o meio. Como exemplo, podemos citar a interface água e aço, apenas transmite 12% e reflete 88% da energia ultra-sônica. [2]

Por esta razão são utilizados alguns acoplantes especiais que reduzem esta diferença significativamente e permitem a passagem das vibrações para a peça ensaiada. Estes líquidos devem ser escolhidos em função do acabamento superficial da peça e das condições do ensaio. [4] A tabela 6 mostra a impedância acústica de alguns materiais e acoplantes usualmente utilizados.

Tabela 6 – Impedância acústica de alguns materiais e acoplantes [1]

| Acoplante | Densidade (g/cm²) | Velocidade da onda (m/s) | Impedância Acústica (g/cm²*s) |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---|
| Óleo (SAE 30) | 0,9 | 1700 | 1,5 x 10 ⁵ |
| Água | 1,0 | 1480 | 1,48 x 10 ⁵ |
| Glicerina | 1,26 | 1920 | 2,4 x 10 ⁵ |
| Carbox Metil Celulose | 1,20 | 2300 | 2,76 x 10 ⁵ |
| Aço | 7,7 | 5900 | 46 x 10 ⁵ |
| Ar ou gás | 0,0013 | 330 | 0,00043 x 10 ⁵ |
| Aço inoxidável austenítico | 7,8 | 5800 | 45,4 x 10 ⁵ |
| Alumínio | 2,7 | 6300 | 17,1 x 10 ⁵ |
| Acrílico | 1,18 | 2700 | 3,1 x 10 ⁵ |

2.1.13 Técnicas de inspeção por ultra-som

Vários são os métodos e técnicas que podem ser realizados na inspeção por ultra-som. A escolha do método apropriado depende das condições de realização do ensaio. [1]

Técnica Impulso-Eco ou Pulso-Eco

Esta técnica é a mais utilizada no ensaio de ultra-som, onde um único transdutor é responsável pela emissão e recebimento das ondas ultra-sônicas que se propagam no material. O transdutor é acoplado em uma das superfícies do material em estudo e é possível verificar a profundidade (P), dimensões e a localização dos defeitos na peça. A figura 9 mostra a técnica impulso eco. [4]

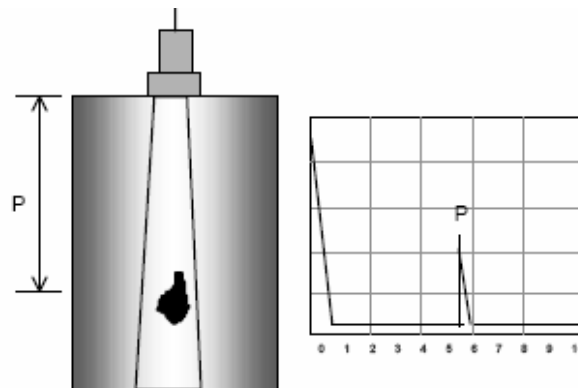


Figura 9 – Técnica Impulso-Eco [1]

Técnica da Transparência

Para realização da técnica da transparência é necessária a utilização de dois transdutores separados. Um dos transdutores atua como emissor da onda sônica e o outro atua como receptor. [2]

O procedimento do receptor é chamado efeito piezoelétrico, enquanto o emissor é o efeito piezoelétrico inverso. [2]

A figura 10 mostra um exemplo da execução da técnica da transparência.

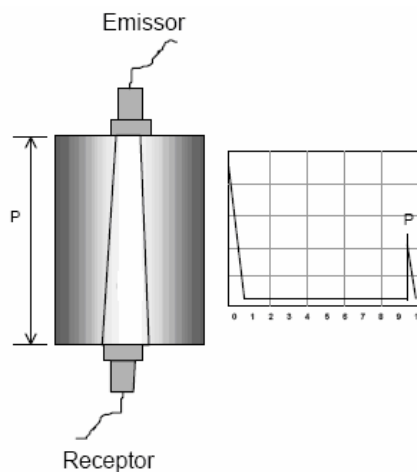


Figura 10 – Técnica da transparência [1]

2.1.14 Atenuação do feixe sônico

A onda sônica ao percorrer um material qualquer sofre em sua trajetória efeitos de dispersão e absorção, resultando na redução da sua energia ao percorrer um material qualquer [1].

A dispersão está associada ao fato da matéria prima não ser totalmente homogênea, contendo interfaces naturais de sua própria estrutura ou processo de fabricação. Para esta mudança das características elásticas de ponto num mesmo material denominamos anisotropia, que é mais significativo quando o tamanho do grão for de 1/10 do comprimento de onda [1].

O fenômeno da absorção ocorre sempre que uma vibração acústica percorre um meio elástico. É a energia cedida pela onda para que cada partícula do meio execute um movimento de oscilação, transmitindo à vibração as outras partículas do próprio meio [1].

O resultado dos efeitos de dispersão e absorção quando somados resultam na atenuação sônica. Na prática, este fenômeno poderá ser visualizado quando observamos na tela do aparelho de ultra-som, vários ecos de reflexão de fundo provenientes de uma peça com superfícies paralelas. As alturas dos ecos diminuem com a distância percorrida pela onda [3].

O fenômeno da atenuação é importante quando inspecionamos peças em que este fator pode inviabilizar o ensaio. É o caso de soldas em aços inoxidáveis austeníticos, peças forjadas em aços inoxidáveis, que são exemplos clássicos desta dificuldade. O controle e avaliação da atenuação nestes casos é razão para justificar procedimentos de ensaios especiais [1].

A tabela 7 mostra alguns valores de atenuação.

Tabela 7 – Valores de atenuação sônica em materiais aço Cr-Ni obtidos em três diferentes processos de fabricação [1]

| Material Aço Cr-Ni | Atenuação sônica em (dB/mm) |
|---------------------------|------------------------------------|
| Forjados | 0,009 a 0,010 |
| Laminados | 0,018 |
| Fundidos | 0,040 a 0,080 |

Divergência do feixe sônico

Outro fenômeno físico responsável pela perda de parte da intensidade ou energia sônica é a divergência que se pronuncia a medida que afastamos a fonte emissora das vibrações acústicas [2].

Tal fenômeno pode ser observado quando detectamos um defeito pequeno com feixe ultra-sônico central do transdutor, em que nestas condições a amplitude do eco na tela do aparelho é máxima. Porém quando afastamos o transdutor lateralmente ao defeito, a amplitude diminui, indicando uma queda da sensibilidade de detecção do mesmo defeito. Este fenômeno é medido pelo fator “k” na fórmula da divergência, e assume valores mostrados na tabela 8 [1].

Tabela 8 – Valores de “k” em função da redução da intensidade sônica [1]

| K | % | Db |
|----------|----------|-----------|
| 0,37 | 71 | -3,0 |
| 0,51 | 50 | -6,0 |
| 0,70 | 25 | -12,0 |
| 0,87 | 10 | -20,0 |
| 0,93 | 6 | -24,0 |
| 1,09 | 1 | -40,0 |
| 1,22 | 0 | 0 |

Quanto mais a borda do feixe sônico incide na descontinuidade, menor será a amplitude do eco e que está relacionado ao fator “k”.

A figura 11 mostra a diferença de sensibilidade (altura do eco de reflexão) quando detectamos o defeito com o feixe ultra-sônico central (1) e quando detectamos o mesmo defeito com a borda do feixe ultra-sônico (2)

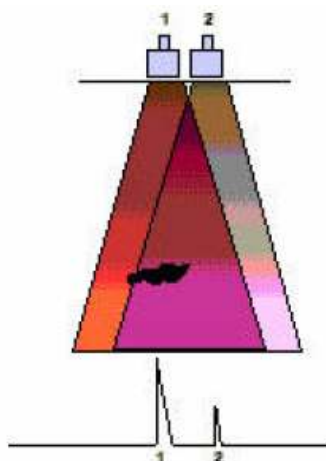


Figura 11 - Variação da sensibilidade de detecção em função da divergência [1]

2.2 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas que contêm pelo menos 10% a 30% de cromo em sua composição química o que lhes confere a propriedade boa resistência a oxidação, mesmo expostos a uma atmosfera normal. Poucos aços inoxidáveis possuem em sua composição porcentagens de cromo superior a 30% e ferro inferior a 50%. [5]

O cromo é um elemento de liga básico dos aços inoxidáveis, cuja passivação é conseguida pela formação de uma película de óxidos e hidróxidos de cromo na superfície do metal. [5]

A película passivadora de óxidos e hidróxidos de cromo, que é resistente e uniforme, tem excelente aderência e plasticidade, baixa porosidade e volatilidade e solubilidade praticamente nulas. O grau de inoxidabilidade do aço depende da estabilidade dessa película, que têm uma espessura média de cerca de 0,02 micrômetros [5].

A taxa com que o aço inoxidável desenvolve sua camada de óxido depende do percentual de cromo utilizado no aço e é formada espontaneamente pela exposição do metal ao ar, ou mais rapidamente, pelo uso do tratamento de passivação. O tratamento de passivação nada mais é que a imersão do material, por poucos minutos, em uma solução de aço nítrico (10% a 50%) [5].

Vários são os elementos que podem ser adicionados para melhorar as características dos aços inoxidáveis (influem na microestrutura do material), dentre os quais podemos citar: molibdênio, cobre, titânio, alumínio, silício, nióbio, nitrogênio, enxofre e selênio [6].

A figura 12 mostra um exemplo prático da adição de elementos de liga em um aço AISI 304 visando obter propriedades especiais [6].

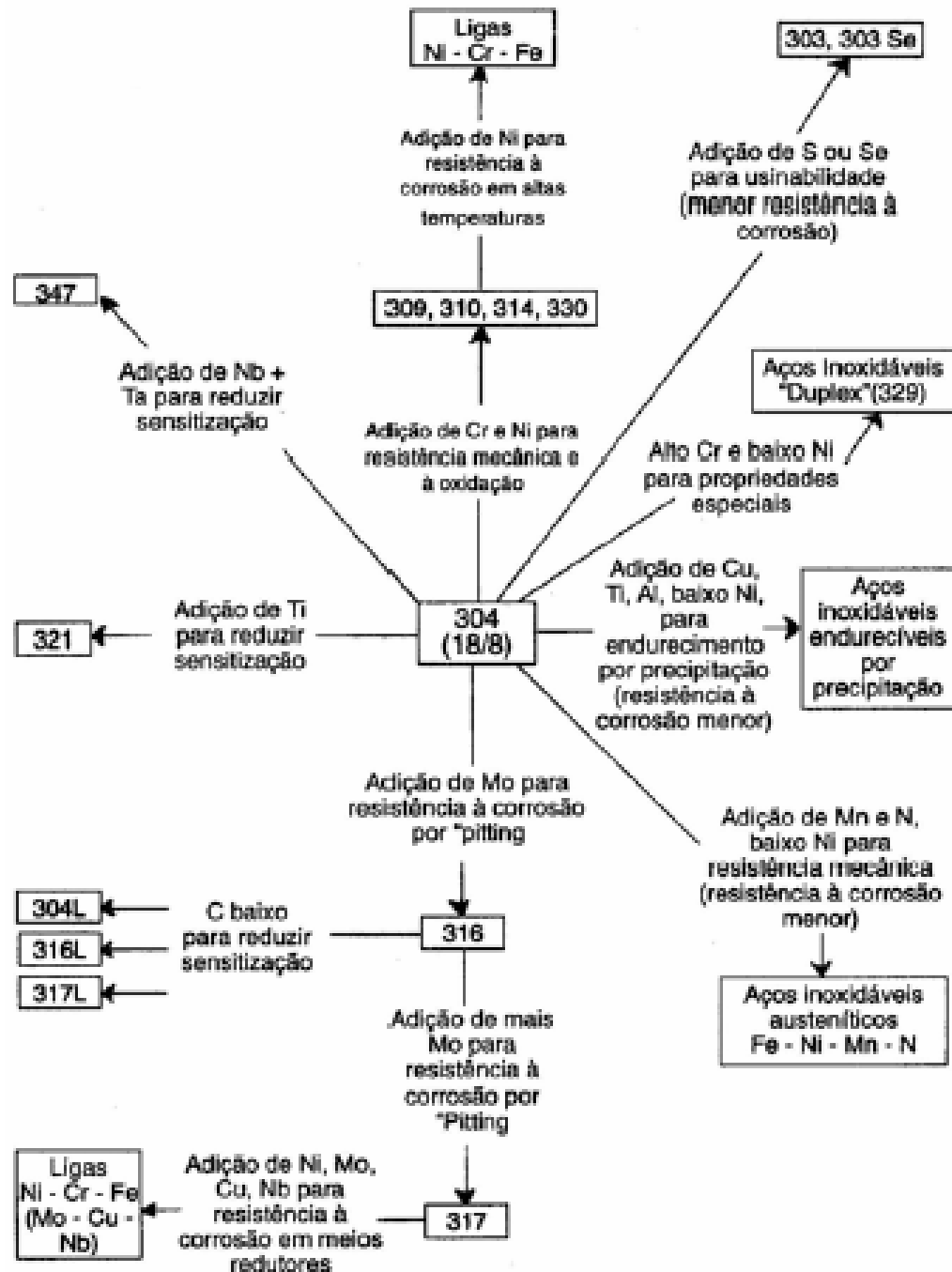


Figura 12 - Modificações na composição do aço AISI 304 visando obter propriedades especiais [6]

É importante salientar que a aparência externa de todos os aços inoxidáveis é a mesma e, portanto, sua distinção e classificação são obtidas através da realização de ensaios mecânicos de caracterização. Este fato obriga a um rigoroso sistema de

identificação, marcação e controle destes materiais, em todas as etapas de compra, armazenamento e emprego da matéria prima [6].

A resistência a meios corrosivos aumenta com o emprego de cromo. Quase todos estes aços estão sujeitos a corrosão por pites e corrosão em locais isolados onde a passivação é rompida ou não consegue se formar completamente. Outro fator muito importante e que contribui muito para resistência aos meios corrosivos diz respeito ao acabamento da superfície do material. Quanto melhor o acabamento da superfície, melhor a resistência a corrosão [7].

A seleção dos aços inoxidáveis pode ser feita com base na resistência a corrosão, nas características de fabricação, nas propriedades mecânicas em escalas de temperaturas específicas e no custo do produto. Entretanto a resistência a corrosão e as propriedades mecânicas são as características mais importantes na seleção das classes de aços inoxidáveis para uma determinada aplicação [6].

Existe uma grande variedade de tipos de aços inoxidáveis. Só a norma ASTM define mais de 80 tipos diferentes. Antigamente os aços inoxidáveis eram basicamente classificados em 3 três grupos, que variam de acordo com a estrutura metalúrgica predominante na liga, em temperatura ambiente. Eram eles [7]:

- Aços inoxidáveis austeníticos: basicamente ligas de Fe-Cr-Ni, não temperáveis;
- Aços inoxidáveis ferríticos: basicamente ligas Fe-Cr, não temperáveis;
- Aços inoxidáveis martensíticos: basicamente ligas Fe-Cr, temperáveis;

Com o crescente desenvolvimento da indústria, surgiram no mercado mais 2 tipos de aços inoxidáveis que foram obtidos com o intuito de melhoria da relação resistência à corrosão x resistência mecânica. São eles:

- Duplex (austeníticos-ferríticos) e os
- Endurecíveis por precipitação.

2.2 Classificação dos aços inoxidáveis

Conforme descrito no parágrafo anterior, atualmente os aços inoxidáveis estão distribuídos em cinco grupos: ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex e endurecíveis por precipitação. [8]

Os aços são classificados pela norma AISI “American Iron and steel Institute” de acordo com a composição química [7].

Os aços austeníticos ao Cr-Ni-Mo são da série 300, os ferríticos ao Cr-Ni da série 300 / 400 e os aços ferríticos ao cromo e os martensíticos pertencem a série 400. Os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação são atribuídos com base no cromo e níquel presentes, onde na série 200 o Manganês (Mn) é substituído pelo Níquel (Ni) [7].

Como o trabalho irá abordar o aço inoxidável austeníticos, o mesmo será abordado mais detalhadamente.

2.2.1 Aços inoxidáveis ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas Fe-Cr com suficiente quantidade de cromo ou cromo mais outros elementos estabilizantes da ferrita, tais como alumínio, nióbio, molibdênio e titânio, para inibir a formação de austenita no aquecimento.

Essas ligas são chamadas ferríticas devido sua estrutura permanecer geralmente ferrítica (cúbica de corpo centrado – ferro α) nas condições normais de tratamento térmico. Os aços inoxidáveis ferríticos são de interesse dos engenheiros projetistas porque eles fornecem aproximadamente a mesma resistência à corrosão oferecida pelos aços austeníticos, mas a um custo mais baixo devido aos baixos teores de níquel presente. Todavia, os ferríticos são de uso mais restrito que os austeníticos, pois, possuem baixas ductilidade e soldabilidade.

2.2.2 Aços inoxidáveis Duplex

São ligas Fe–Cr–Ni–Mo que possuem uma estrutura mista de ferrita (cúbica de corpo centrado) e austenita (cúbica de face centrada) , onde a quantidade exata de cada fase depende da composição química do aço e do tratamento térmico utilizado. A maioria das ligas possui a mesma quantidade de fases na condição de recozido [7].

Os principais elementos são o Cromo e o Níquel, mas outros componentes como Nitrogênio, Molibdênio, Silício, Cobre e Tungstênio podem ser adicionados para melhorar as condições de resistência a corrosão [7].

2.2.3 Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação

De acordo com a sua estrutura após solubilização, estes aços podem ser divididos em martensíticos, semi-austeníticos e austeníticos.

Essas ligas, usualmente, contêm de 10 a 30% de cromo, junto com variações nas quantidades de níquel e molibdênio. As fases precipitadas endurecidas são formadas com a adição de cobre, alumínio, titânio e nióbio.

São capazes de desenvolver elevados níveis de resistência mecânica, pela formação de martensita e ou finos precipitados, com ductilidade e tenacidade superiores a outros aços de resistência similar em junção com boa resistência à corrosão e oxidação.

2.2.4 Aços inoxidáveis martensíticos

São ligas Fe-Cr magnéticas que possuem em sua composição química porcentagem de cromo variando de 12 a 18% e carbono variando de 0,15 a 1,20% e possuem a capacidade de desenvolver uma estrutura martensítica quando sofrem um tratamento térmico de austenitização e têmpera. Com a composição química dos aços inoxidáveis martensíticos é ajustada para otimizar a resistência mecânica e a dureza, a resistência a corrosão destes aços é relativamente mais baixa quando comparada com a dos aços do tipo ferrítico e austenítico [8].

2.2.5 Aços inoxidáveis austeníticos

É a classe dos aços inoxidável mais numerosa e mais utilizada nas aplicações industriais. São materiais desenvolvidos com auxílio de conhecimentos científicos, isto é, considerações científicas orientaram seus descobrimentos e suas propriedades foram qualitativamente interpretadas possibilitando modificações e criações de novas ligas, baseadas em conhecimentos científicos e exigências atuais [5].

Apresentem estruturas cristalinas cúbicas de face centrada não sendo endurecíveis por tratamento térmico. Contém cerca de 6 a 26% de Níquel, 16 a 30% de Cromo e menos que 0,3% de Carbono [6].

Esta classe inclui, na maioria dos casos, ligas Fe–Cr–Ni, embora existam ligas em que parte ou todo o níquel é substituído por manganês ou hidrogênio [6].

Não são magnéticos e geralmente são recozidos e trabalhados a frio. Alguns aços austeníticos podem se tornar ligeiramente magnéticos após o trabalho a frio. Apresentam a temperatura ambiente, um baixo limite de escoamento, alto limite de resistência e elevada ductibilidade. Destacam-se pela melhor soldabilidade e resistência à corrosão se comparada aos demais grupos existentes [6].

2.2.5.1 Propriedades mecânicas

Os aços inoxidáveis austeníticos tradicionais apresentam no estado recozido, quando ensaiados em tração a temperatura ambiente, limite de escoamento na faixa de 200 a 250 N/mm², limite de resistência na faixa de 450 a 700 N/mm² e alongamento total na faixa de 35 a 45% [9]. Entretanto, a adição de elementos de liga pode conferir melhorias à resistência mecânica dos aços austeníticos. Apesar dos aços duplex alcançarem propriedades mecânicas aproximadas as ligas austeníticas, as maiores vantagens desta última diz respeito a manutenção destas propriedades sob condições de temperaturas extremas, a boa ductilidade e tenacidade, além da alta resistência aos desgastes corrosivos e abrasivos [9].

2.2.5.2 Metalurgia da soldagem

A soldabilidade de ligas austeníticas é relativamente boa. A ausência da transformação martensítica e a boa tenacidade melhoram muito a fragilização pelo hidrogênio. A sensibilidade á formação de porosidade também é baixa e a zona fundida tem propriedades que se assemelham ao metal de base [10].

Contudo estes benefícios só podem ser obtidos se os parâmetros envolvidos no processo de soldagem forem selecionados adequadamente, o que deve ser feito levando-se em considerações os princípios da metalurgia da soldagem e nas condições de trabalho estabelecidas. Características como a susceptibilidade a trincas a quente e a tenacidade a baixas temperaturas, são bastante afetadas pelas

complexas reações que podem se desenvolver em função da composição química do aço e da velocidade de resfriamento dos depósitos de solda [10].

2.2.5.3 Efeito dos elementos de liga sobre as características dos aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis podem ter adições de elementos de ligas visando a obtenção de propriedades específicas. Uma forma de avaliar estes efeitos de cada elemento de liga é agrupando-os em termos da fase que estabilizam durante a solidificação da liga. Deste modo, obtém-se o grupo dos elementos estabilizadores da ferrita, chamados cromo equivalente “Cr_{eq}”, e os estabilizadores da austenita, chamados de níquel equivalentes “Ni_{eq}” [11].

Várias expressões de forma são descritas na literatura para calcular estes dois elementos, porém, de forma genérica, estas expressões podem ser descritas como:

$$Cr_{eq} = \%Ni + a(\%Mn) + b(\%C) + c(\%N) + d(\%Cu) + e(\%Co) \quad [10]$$

$$Ni_{eq} = \%Cr + f(\%Si) + g(\%Mo) + h(\%Al) + i(\%Nb) + j(\%Ti) + l(\%V) \quad [11]$$

Onde as letras a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, e l são constantes para um elemento específico nas diversas propostas definidas na literatura. Os valores destes coeficientes para cada autor não são coincidentes [11].

A partir destas expressões, são definidos os diagramas constitucionais, que permitem uma previsão da microestrutura e o teor de ferrita ou Ferrite Number, “FN”, a serem obtidos para uma determinada composição química. Desde que o fenômeno de solidificação das ligas metálicas tornou-se alvo do interesse da indústria, vários diagramas constitucionais foram criados, dentre os quais se destaca o diagrama de Delong [11]. O diagrama de Delong estabelece que os coeficientes utilizados para o cálculo dos teores equivalentes de cromo e níquel são:

$$\text{Níquel Equivalente} = \%Ni + 30 \times \%C + 30 \times \%N + 0,5 \times \%Mn \quad [12]$$

$$\text{Cromo Equivalente} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Cb \quad [13]$$

A tabela 9 mostra uma breve descrição dos efeitos de alguns elementos de liga sobre os aços inoxidáveis austeníticos .

Tabela 9 – Efeitos dos elementos de liga nos aços inoxidáveis austeníticos [8]

| Elemento | Classe dos aços | Efeitos |
|-----------------|------------------------|--|
| C | Todos | Promove fortemente a formação de austenita. Pode formar carboneto com cromo e resultar em corrosão intergranular |
| Cr | Todos | Promove a formação de ferrita. Aumenta as resistências a oxidação e corrosão. |
| Ni | Todos | Promove formação da austenita. Aumenta resistência mecânica em alta temperatura, a resistência a corrosão e a ductilidade. |
| N | XXX N | Promove fortemente a formação da austenita. Aumenta resistência mecânica |
| Nb | 347 | Reduz à sensibilidade a corrosão intergranular combinado com o C. Age como refinador de grão. Promove a formação de ferrita. Aumenta à resistência a fluência. |
| Mn | 2XX | Estabiliza a austenita a temperatura ambiente, mas forma ferrita em altas temperaturas. Inibe a fragilidade a quente pela formação de MnS. |
| Mo | 316 e 317 | Aumenta a resistência mecânica á alta temperatura. Aumenta à resistência a corrosão em meios redutores. Promove a formação de ferrita. |
| P,Se,S | 303 e 303 Se | Melhora a usinabilidade, mas promovem trincas de solidificação. Diminuem ligeiramente a corrosão. |
| Si | 302 B | Aumenta a resistência a formação de carepa e promove a desoxidação e a formação de ferrita. |
| Ti | 321 | Reduz a sensibilidade á corrosão intergranular combinando com o C. Age como refinador de grão e promove a formação de ferrita. |
| Cu | --- | Aumenta a resistência a corrosão em certos meios. Diminui a sensibilidade a corrosão sob tensão. Causa efeitos endurecedores por envelhecimento. |

2.2.5.4 A ferrita “ δ ” nos aços inoxidáveis austeníticos

Os diagramas de equilíbrio Fe-Cr-Ni prevêem uma microestrutura completamente austenítica ao final da solidificação de uma liga desta classe. Contudo, durante os processos normais de solidificação, fundição e soldagem, pelo menos uma segunda fase (ferrita) é formada na estrutura destas ligas [11].

Durante o resfriamento, a ferrita “ δ ” se forma em pequenas ligas ou cadeias nos contornos de grãos dendríticos. Alguns tratamentos térmicos pós-processamento em torno de 930° C, podem dissolver parcialmente ou esferoidizar a ferrita “ δ ”, reduzindo os teores desta fase [11].

As principais vantagens conferidas pela ferrita “ δ ”, em baixos teores, as ligas inoxidáveis austeníticas são [11]:

- Melhor controle de trincas a quente e micro fissuração no metal de solda;
- Aumento da resistência a tração em algumas ligas;
- Aumento da resistência a trincas originadas do processo de corrosão sob tensão.

Entretanto, desvantagens são apontadas como [11]:

- Redução da resistência a corrosão em ligas com teores altos de molibdênio, o que pode ser atenuado através de um rigoroso controle da composição química, como por exemplo e aços tipo 316 e 316L;
- Transformação da ferrita em fase sigma quando as temperaturas de serviço excedam 540° C constantemente, provocando um grande decréscimo na ductilidade e na resistência ao impacto de soldas.

Porém, a presença desta fase, deteriora as propriedades corrosivas do aço e reduz a sua dureza. Para uma estrutura bifásica, como a resultante da soldagem dos aços austeníticos, existem diferenças de estrutura e composição química entre a ferrita e a austenita, podendo resultar na formação de células galvânicas localizadas devendo, portanto, ser limitada a quantidade de ferrita na zona fundida [12].

2.2.5.5 Sequências de solidificação das ligas inoxidáveis austeníticas

A microestrutura da zona fundida dos aços inoxidáveis austeníticos pode ser analisada com o auxílio do diagrama pseudo-binário do sistema Fé-Cr-Ni para 70% de Fe conforme mostrado na figura 13 [8].

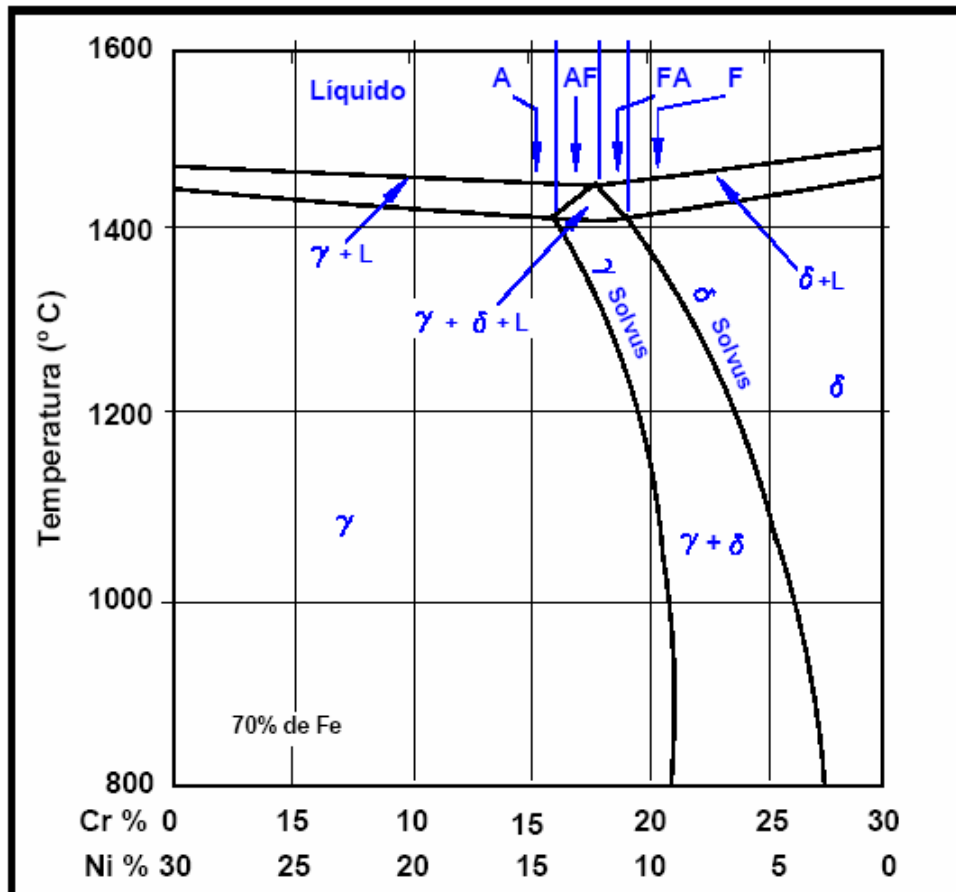


Figura 13 – Secção vertical de um diagrama Fe-Cr-Ni pseudo-binário, para um teor de Fe de 70% em peso [8]

Como pode ser observado por este diagrama, o metal líquido contendo 70% de Fe e com diferentes quantidades de Cr e Ni pode se solidificar das seguintes formas [13] :

- Inteiramente com a austenita (A);
- Inicialmente como austenita e posteriormente como ferrita (AF);
- Inicialmente como ferrita e depois como austenita (FA);
- Inteiramente como ferrita (F).

O modo de solidificação observado em determinada liga é função da relação entre os teores de Cromo e Níquel. A morfologia da ferrita retida nas soldas de aços inoxidáveis austeníticos é um indicativo de grande relevância na determinação da seqüência de solidificação destas ligas [13].

A seqüência de solidificação tem maior significância sobre a resistência a trincas de solidificação, que propriamente o conteúdo de ferrita retido na matriz dos aços austeníticos [9]. Esta seqüência de solidificação por sua vez, pode ser deduzida a partir do estudo morfológico da ferrita presente na microestrutura. Desta forma, pode ser feita uma descrição sucinta sobre os modos de solidificação apresentados através de uma representação esquemática morfológica de ferrita associada a cada modo verificado na figura 13 [13].

- a) Austenita: Solidificação ocorre diretamente em austenita, sem a formação de ferrita. Este modo de solidificação é representado na literatura pela letra A.
- b) Austenita + ferrita eutética: Consiste na formação de austenita primária com formação de ferrita em reação eutética ao final da solidificação. A formação da ferrita ocorre nos contornos de grão ou de dendritas ou células, como resultado da segregação de elementos ferritizantes nesses pontos. Este modo de solidificação é designado por AF.
- c) Austenita + ferrita em espinha vermicular (FA): Resulta de solidificação em ferrita primária com formação de austenita tanto nas etapas finais como já no estado sólido. A ferrita remanescente se localiza ao longo do centro das dendritas. Este modo de solidificação frequentemente observado em soldas de aços inoxidáveis austeníticos.
- d) Austenita + ferrita em placas; o processo de solidificação inicia-se em ferrita, com posterior transformação desta austenita, principalmente no estado sólido. Esta microestrutura é característica de soldas com elevada quantidade de ferrita ou resfriadas rapidamente. A designação da literatura para este modo de solidificação também é simbolizada por AF.

A figura 14 mostra os exemplos de morfologias da ferrita δ na zona fundida de aços inoxidáveis austeníticos [8].

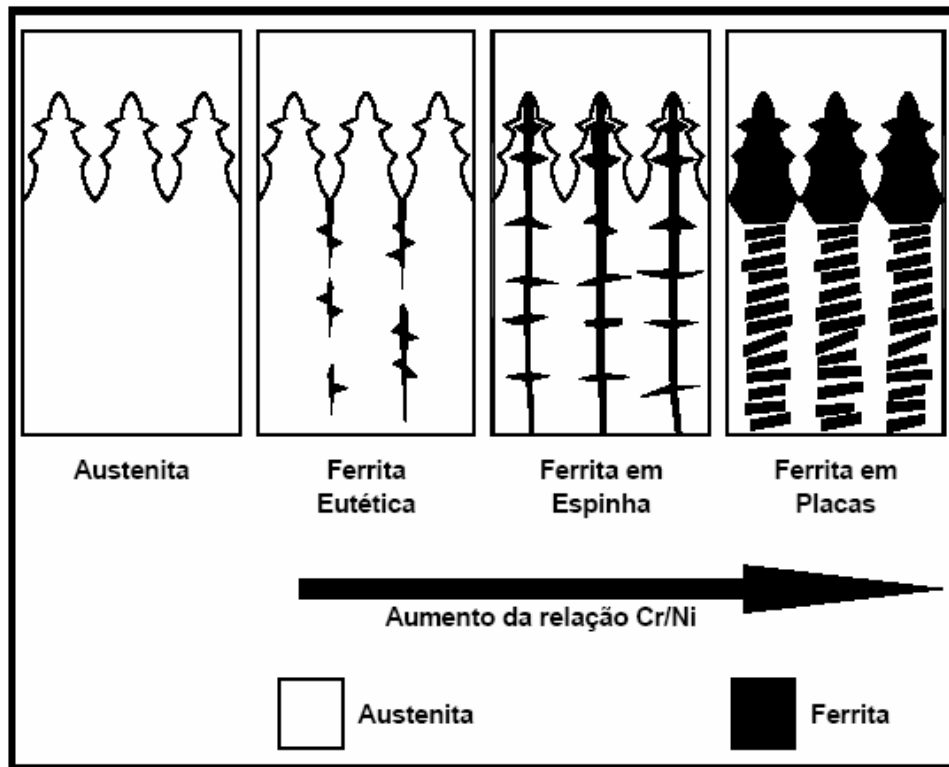


Figura 14 – Exemplos de morfologias de ferrita δ na zona fundida de aços inoxidáveis austeníticos [8]

2.2.5.6 Determinação dos teores de ferrita δ (técnicas de medição)

A determinação da quantidade de ferrita δ na matriz dos aços inoxidáveis austeníticos pode ser determinada através de um equipamento denominado ferritoscópio. Este aparelho opera segundo um princípio de funcionamento baseado na avaliação das propriedades magnéticas das amostras, comparando-as com experimentos padrões existentes por um processo simples de calibração [11].

2.3 Radiografia Industrial

A radiografia industrial é um método de ensaio não destrutivo que tem por objetivo realizar um registro de imagem obtido através da penetração da radiação, quando atravessa um material e atinge um filme fotográfico [14].

2.3.1 Fontes emissoras de radiação

Na área industrial existem atualmente 2 (duas) fontes de emissão de radiação: os raios-x e os raios Gama [15].

O raio-x é a técnica convencional via filme radiográfico com a utilização do gerador de raio-x com ampola metal cerâmica. O raio-x é gerado quando elétrons em alta velocidade chocam-se com a matéria. Os elétrons são “freados” pelo alvo, ou seja, existe uma interação entre os elétrons e os átomos do alvo onde são gerados os raios-X [15].

Os raios gama utilizam a mesma técnica, porém tendo como fonte de radiação um material radioativo, chamado de isótopo radioativo, que pode ser o Iridio, o Cobalto ou modernamente o Selênio. A geração dos raios Gama é obtida através da desintegração do núcleo de elementos radioativos naturais ou artificiais. Produzidos artificialmente, as principais fontes de raio Gama são [15]:

- Cobalto 60 – Obtido de forma artificial através do bombardeamento de nêutrons do elemento Cobalto 59;
- Iridio 192 – Obtido artificialmente através do bombardeamento de nêutrons do elemento Iridio 191.

Para que seja realizada uma radiografia industrial é necessário a presença de três elementos importantes [16]:

- Fonte emissora de radiação penetrante;
- Material a ser radiografado;
- Um meio no qual a radiação possa ser detectada e analisada, no caso um filme.

2.3.2 Equipamentos de Gamagrafia Industrial

Os equipamentos necessários para execução da Gamagrafia Industrial são [16]:

- Cabo de Comando: Componente responsável em expor a fonte radioativa.
- Irradiador: Componente responsável em armazenar a fonte radioativa.
- Tubo Guia: Equipamento responsável em expor a fonte radioativa até o local onde se deseja direcionar a radiação.

As figuras 15, 16 e 17 mostram os equipamentos de gamagrafia industrial:



Figura 15: Irradiador de uma fonte radioativa de Iridio 192



Figura 16 - Tubo Guia – Responsável por direcionar a fonte ao local da exposição



Figura 17 - Cabo de comando – Responsável por expor a fonte de radiação

2.3.3 Tipos de filmes radiográficos

São compostos de uma emulsão e uma base. A emulsão consiste em uma camada muito fina, com espessura aproximada de 0,25 mm de gelatina, que contém dispersos em seu interior um grande número de minúsculos cristais de brometo de prata [17].

Os cristais de brometo de prata presentes na emulsão possuem a propriedade de, quando atingidos pela radiação ou luz, tornarem-se susceptíveis a reagir com um produto químico denominado revelador [17].

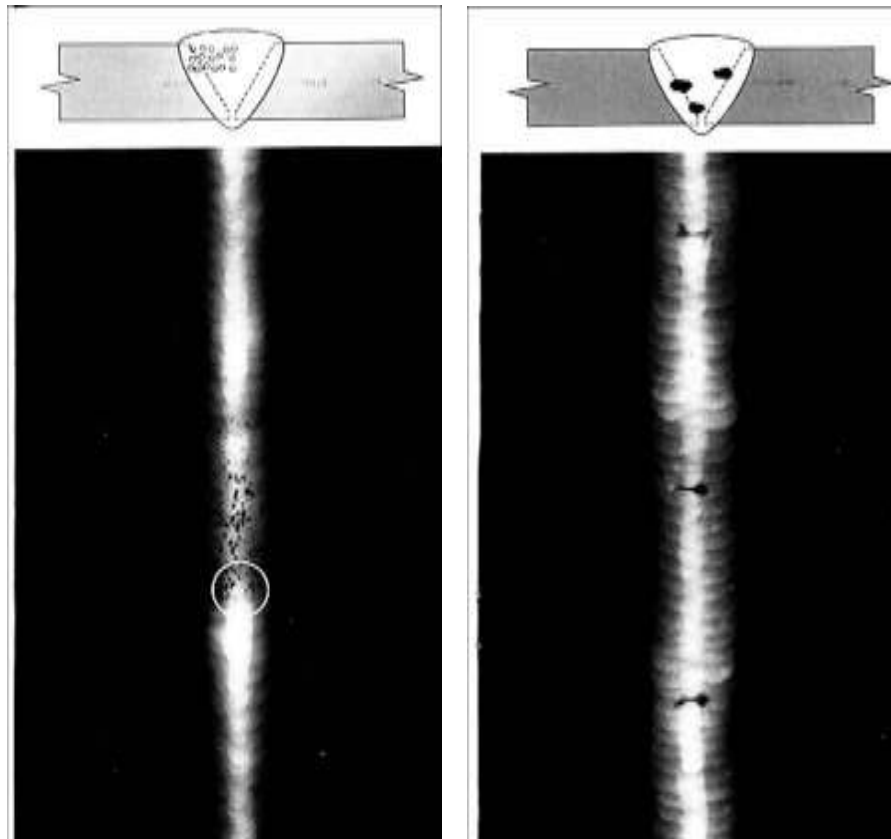
O componente químico denominado revelador é responsável por formar a imagem radiográfica, que é formada por áreas claras e escuras [17].

A esta conjunto de áreas claras e escuras é chamado de densidade do filme radiográfico, definida também como grau de enegrecimento do filme radiográfico.

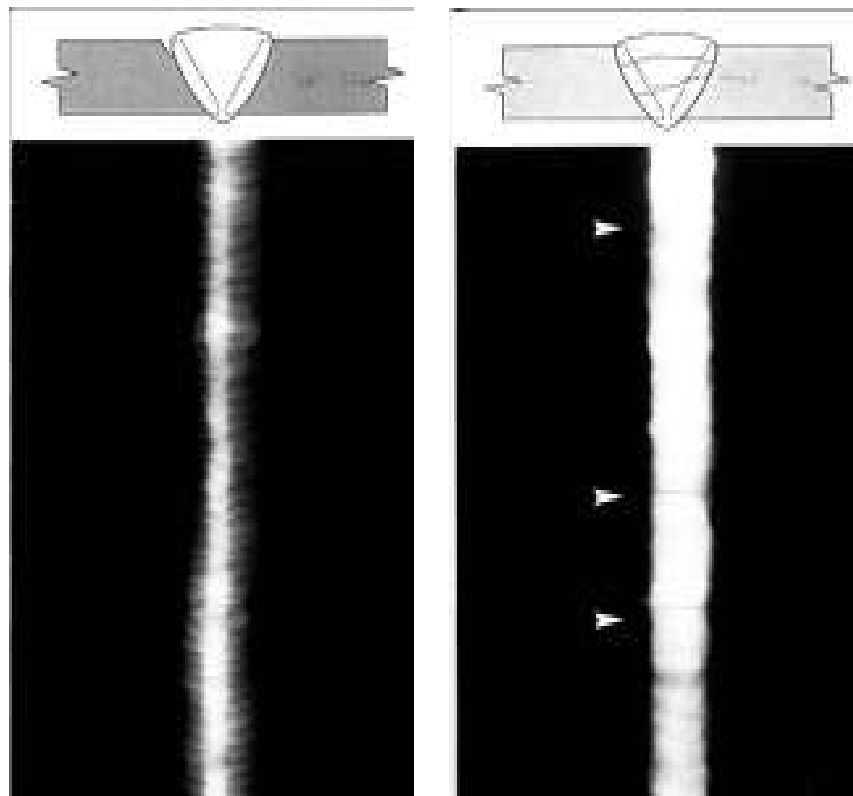
Os filmes mais utilizados na indústria atualmente são [17]:

- Filme Tipo I: Possuem maior sensibilidade e são utilizados para peças com espessuras mais reduzidas, até 9,5 mm;
- Filme Tipo II: São os filmes muito utilizados na execução de peças com espessura elevada e superiores a 9,5 mm.

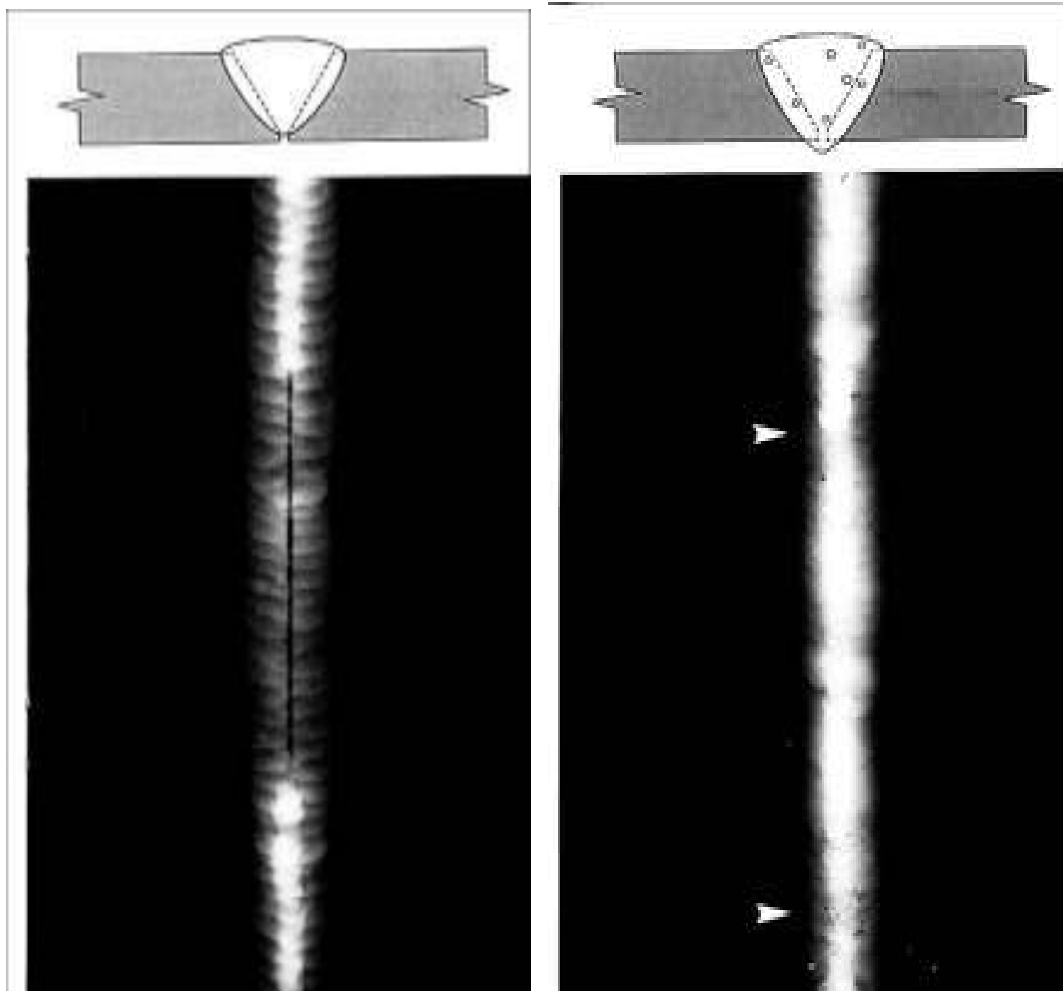
As figuras 18 a 23 mostram alguns exemplos de imagens radiográficas em juntas soldadas, mostrando de que forma os defeitos são visualizados.



Figuras 18 e 19 - Exemplos de defeitos de soldagem do tipo porosidade apresentados em uma imagem radiográfica



Figuras 20 e 21 - Exemplos de defeitos de soldagem do tipo trincas e concavidade externa apresentados em uma imagem radiográfica



Figuras 22 e 23 - Exemplos de defeitos de soldagem do tipo falta de penetração e poros isolados apresentados em uma imagem radiográfica

2.3.4 Determinação da sensibilidade da imagem radiográfica

Segundo os requisitos estabelecidos no código ASME Seção V – Edição 2004, a sensibilidade da imagem radiográfica é verificada através da utilização dos indicadores de qualidade de imagem, IQI's [18].

A escolha do IQI está relacionada com a espessura do material (acrescido do reforço de solda) a ser ensaiado [18].

CAPITULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Elaboração do Procedimento de execução do ensaio de ultra-som

O procedimento que será elaborado tem o objetivo de descrever as condições mínimas e práticas recomendadas na realização do ensaio não destrutivo por ultra-som em chapas soldadas de topo do material AISI 316.

Todo o procedimento de ultra-som estará baseado na norma ASME – Boiler and Pressure Vessel Code, Section V – Edition 2004 - Nondestructive Examination - The American Society of Mechanical Engineers.

No procedimento está definido o método de ultra-som que será realizado, descrição dos blocos de calibração e referência utilizados para determinação dos parâmetros de execução e sensibilidade do método aplicado. Estão definidas também a sistemática da traçagem das curvas de referência utilizadas para inspeção com cada cabeçote utilizado e os critérios utilizados como referência para a inspeção das juntas soldadas de topo.

3.2 Fabricação dos blocos de calibração e referência para realização do ensaio

Os blocos de calibração e de referência foram fabricados no material AISI 316, mesmo material utilizado na fabricação dos corpos de prova.

3.2.1 Bloco de Calibração do Aparelho

Para calibração da escala do aparelho foi realizada a fabricação do bloco de calibração V1 conforme requisitos dimensionais estabelecidos na norma ASME V – Edição 2004 e requisitos contidos na norma DIN 54120.

A figura 24 mostra o aspecto geral do bloco de calibração V1 utilizado para calibração da escala horizontal do aparelho.

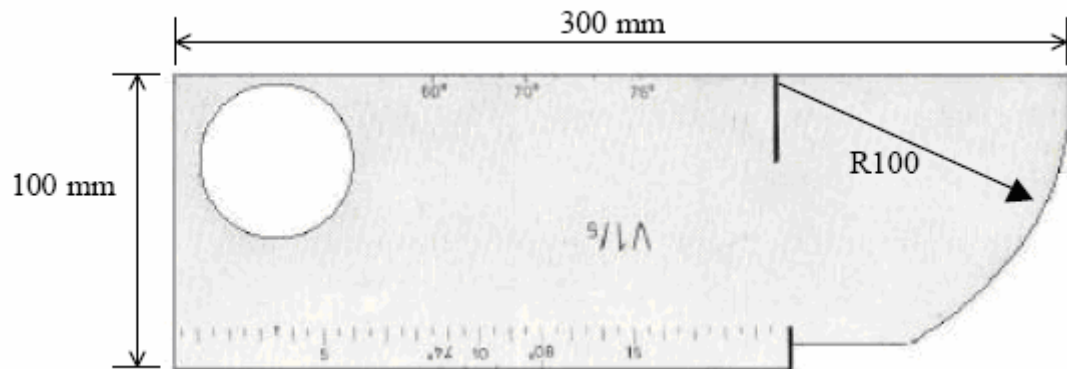


Figura 24 – Aspecto do bloco V1 utilizado para calibração da escala horizontal do aparelho de ultra-som

A figura 25 abaixo mostra o aspecto do bloco de calibração V1 fabricado em aço AISI 316 utilizado para a calibração do aparelho de ultra-som.



Figura 25: Bloco V1 – Fabricado conforme requisitos dimensionais estabelecidos no código ASME V

3.2.2 Bloco de referência utilizado para traçagem das curvas de referência de cada cabeçote utilizado

Para calibração da sensibilidade do ensaio através da construção das curvas de referência de inspeção para cada cabeçote utilizado, foi realizada a fabricação do bloco de referência com espessura de 20 mm e furos de $\text{Ø}2,4$ mm, conforme requisitos dimensionais estabelecidos na norma ASME V – Edição 2004 e descritos no procedimento de ensaio.

A fotos 26, 27 e 28 mostram o aspecto do bloco de referência fabricado para a construção das curvas de referência de cada cabeçote que será utilizado.



Figuras 26 e 27 - Aspecto geral do Bloco de referência utilizado para determinação das curvas de referência para cada tipo de cabeçote utilizado – Dimensões contidas no Procedimento de ultra som – item 9

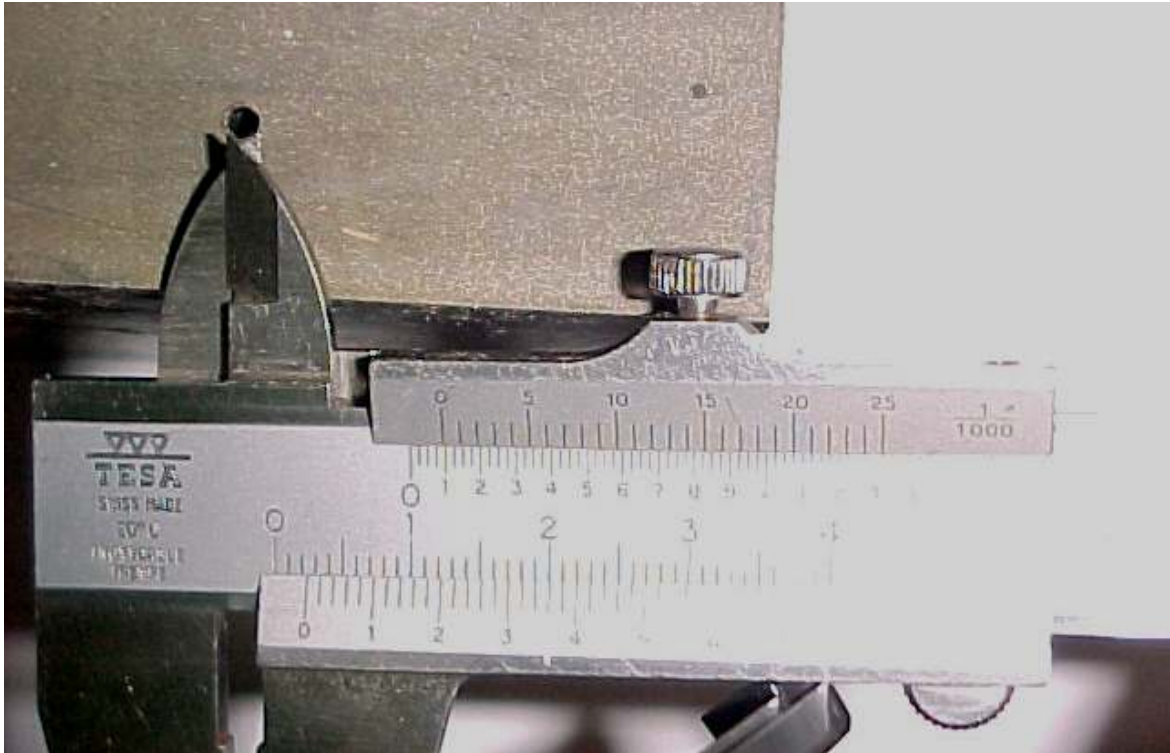


Figura 28 - Detalhe dos furos de $\varnothing 2,4$ mm realizados ao longo da espessura do bloco conforme dimensões contidas no procedimento de ultra-som – Item 9

3.3 Seleção dos equipamentos necessários para realização do ensaio

A seleção dos materiais utilizados na pesquisa foi baseada nos seguintes aspectos:

- Aparelho de ultra-som utilizado;
- Tipos de cabeçotes de ultra-som disponíveis para pesquisa;
- Seleção da melhor frequência dos cabeçotes, em função de aspectos teóricos da pesquisa e da disponibilidade deste material para execução do ensaio;
- Espessura do corpo de prova avaliado;
- Acoplantes utilizado para realização do ensaio, em função dos corpos de prova que serão avaliados.

3.3.1 Aparelho de ultra-som industrial

Para execução do ensaio de ultra-som foi utilizado o aparelho marca Krautramer Modelo USM II com tensão de 220 V.

A figura 29 mostra o aparelho de ultra-som utilizado.



Figura 29 - Aparelho de ultra-som marca Krautkramer – Modelo: USM II

A figura 30 mostra as funções do aparelho de ultra-som modelo USM II.

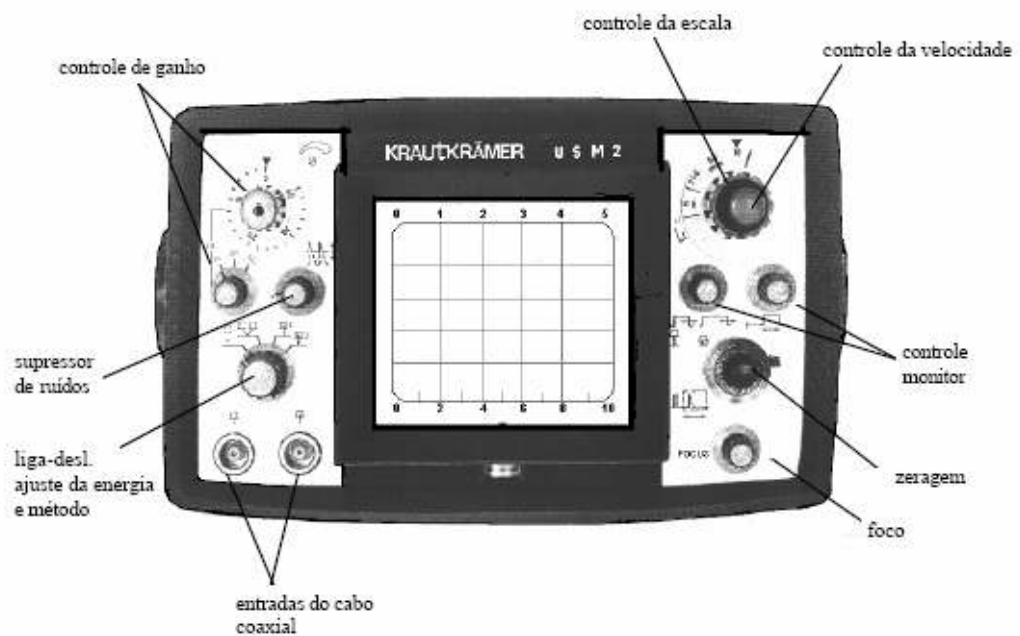


Figura 30 - Funções do aparelho de ultra-som marca Krautkramer modelo USM-II

3.3.2 Cabeçotes utilizados para realização do ensaio

Serão utilizados na pesquisa os cabeçotes de ultra-som utilizados na indústria. A seleção dos cabeçotes foi realizada tomando-se como referência os seguintes aspectos:

3.3.2.1 Frequência dos cabeçotes de ultra-som utilizados

A seleção da frequência dos cabeçotes utilizados foi baseada no tamanho do defeito a ser detectado, ou seja, a relação comprimento de onda x velocidade x frequência abordada na revisão bibliográfica conforme tabelas 4 e 5 do trabalho.

Em função disto, todos os cabeçotes de ultra-som que serão utilizados nas atividades práticas, apresentam frequência de 4 MHz.

3.3.2.2 Tipos de incidência das ondas ultra-sônicas

Para uma melhor análise do comportamento das ondas sônicas na propagação do material AISI 316 Ti, serão utilizados os seguintes cabeçotes:

- Cabeçote Duplo Cristal – Incidência normal
- Cabeçote angular de 45° - Incidência oblíqua, com inclinação de 45° em relação a espessura da peça a ser ensaiada;
- Cabeçote angular de 60° - Incidência oblíqua, com inclinação de 60° em relação a espessura da peça a ser ensaiada;
- Cabeçote angular de 70° - Incidência oblíqua, com inclinação de 70° em relação a espessura da peça a ser ensaiada.

As figuras 31 a 38 mostram os cabeçotes de ultra-som utilizados para o ensaio.



Figuras 31 e 32 - Cabeçote Duplo Cristal Krautkramer de 4 MHz – Numero de Série 57462 1594.
Vista Superior e Frontal



Figuras 33 e 34 - Cabeçote Angular Krautkramer de 45° de 4 MHz – Numero de Série 56907
07266. Vista Superior e Frontal



Figuras 35 e 36 - Cabeçote Angular Krautkramer de 60° de 4 MHz – Numero de Série 06092. Vista
Superior e Frontal



Figuras 37 e 38 - Cabeçote Angular Krautkramer de 70° de 4 MHz – Numero de Série 36920 09206.
Vista Superior e Frontal

3.3.2.3 Espessura dos corpos de prova que serão ensaiados

A seleção da espessura dos corpos de prova foi realizada em função da disponibilidade do material existente para fabricação dos corpos de prova.

Em função disto, as espessuras dos corpos de prova avaliados serão de 10 mm.

3.3.2.4 Acoplante utilizado para realização do ensaio

Em função das condições superficiais da peça e das condições do ensaio, será utilizado o acoplante Carbox metil celulose.

3.4 Seleção dos corpos de prova

Para a execução do trabalho, foram utilizados 3 (três) corpos de prova fabricados em aço inoxidável austenítico conforme especificação do AISI 316.

A especificação do procedimento de soldagem utilizada para os corpos de prova está demonstrada no apêndice 2 do trabalho. Para execução do procedimento de soldagem foi utilizado à norma ASME Seção IX – Edition 2004.

3.5 Propriedades mecânicas dos corpos de prova

Serão avaliadas e caracterizadas algumas propriedades mecânicas dos corpos de prova, como segue:

- Determinação da composição química do metal de base, utilizando-se espectrômetro de emissão óptica;
- Determinação da composição química do depósito de solda efetuado, utilizando-se espectrômetro de emissão óptica marca Bird;
- Medição da ferrita delta no depósito de solda efetuado através da medição com aparelho ferritoscópio.

Os ensaios serão realizados no laboratório da empresa Spectroscan Tecnologia de Materiais Ltda.

Para determinação do ensaio de emissão óptica será utilizado o espectrômetro de emissão óptica marca Bird, rastreado em certificados emitidos por Brammer Standard Co. Padrão BS 81E-304L. A figura 39 mostra o aspecto do equipamento:



Figura 39 - Espectrômetro de emissão óptica marca BIRD

A medição de ferrita delta dos depósitos de solda efetuados nos corpos de prova serão realizadas utilizando-se o Ferritoscópio marca Ecolmeter.

A figura 40 mostra o equipamento, de propriedade da empresa Spectroscan, utilizado para medição.



Figura 40: Ferritoscópio Ecolmeter utilizado para medição da ferrita delta

3.6 Determinação das curvas de referência para cada cabeçote utilizado

Serão estabelecidas conforme metodologia estabelecida no procedimento de execução do ensaio.

Conforme estabelecido no código ASME – Seção 5, estas curvas de referência serão utilizadas para a realização do ensaio de ultra-som nos corpos de prova.

3.7 Realização do ensaio de ultra-som nos corpos de prova

O ensaio será realizado utilizando-se a técnica do impulso-eco. Para avaliação das juntas soldadas serão utilizadas as curvas de referência estabelecidas no item 3.6.

O laudo das juntas soldadas será realizado utilizando-se como referência o critério de aceitação definido no código ASME – Seção VIII – Edition 2004.

3.8 Realização do ensaio de Gamagrafia para comparação dos resultados obtidos com o ensaio de ultra-som

Os ensaios de gamagrafia das juntas soldadas de topo foram realizados pela empresa Engisa Ltda. Para realização do ensaio radiográfico foi utilizado uma fonte de Gamagrafia de Irídio 192 com atividades variando de 20 a 30 Ci e filmes do Tipo I para se obter uma melhor sensibilidade da imagem radiográfica.

Os ensaios foram executados conforme Procedimento Engisa END 009 revisão 10, que contempla todos os requisitos estabelecidos no código ASME V – Edição 2004.

A avaliação e o laudo das juntas soldadas foram realizados por profissionais certificados junto ao organismo SNQC (Sistema Nacional de Qualificação e Certificação) de profissionais ligados ao setor de ensaios não destrutivos.

As imagens radiográficas foram avaliadas segundo o critério estabelecido na norma ASME Seção VIII – Divisão 1, mesmo critério adotado para inspeção das juntas soldadas com a técnica do ultra-som.

A figura 41 mostra o aparelho de gamagrafia que será utilizado para execução da radiografia nos corpos de prova.



Figura 41 - Aspecto do irradiador utilizado para execução do ensaio de gamagrafia nos corpos de prova.

A figura 42 mostra um exemplo de (IQI) Indicador de qualidade de imagem utilizado no ensaio de gamagrafia.



Figura 42 - Modelo de Indicador de qualidade de imagem utilizado na gamagrafia industrial.

O IQI deve se posicionado perpendicularmente ao eixo da solda.

A determinação da escolha do IQI adequado para cada espessura de material é verificada através das tabelas de execução definidas no código ASME Seção V – Edição 2004.

CAPITULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante o desenvolvimento de todo o trabalho. Dentre eles os ensaios mecânicos, caracterizações microestruturais, análise químicas, os resultados obtidos no ensaio de ultra-som e a comparação destes resultados através da Gamagrafia Industrial.

4.1 Propriedades mecânicas dos corpos de prova

Os ensaios mecânicos foram realizados nos 3 (três) corpos de prova utilizados para realização da parte prática do trabalho.

4.1.1 Resultados da composição química dos corpos de prova

Foram realizadas 3 medições ao longo de cada corpo de prova e foram obtidos as seguintes médias aritméticas em elementos específicos;

Tabela: 10 Composição química (%) das chapas dos corpos de prova utilizados

| | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| Fe | C | Mn | P | S | Cr |
| 69,10 | 0,067 | 1,34 | 0,040 | 0,026 | 17,03 |
| Ni | Mo | Si | Cu | V | Al |
| 9,61 | 2,05 | 0,454 | 0,181 | 0,045 | 0,014 |

4.1.2 Resultados da composição química do depósito de solda efetuado

Foram realizadas 3 medições ao longo da junta soldada de cada corpo de prova e foram obtidos as seguintes médias aritméticas em elementos específicos;

Tabela 11: Composição química (%) dos depósitos de solda efetuados nos corpos de prova utilizados

| | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| Fe | C | Mn | P | S | Cr |
| 64,01 | 0,072 | 1,30 | 0,030 | 0,023 | 19,23 |
| Ni | Mo | Si | Cu | V | Al |
| 11,87 | 2,54 | 0,685 | 0,207 | 0,025 | 0,010 |

4.1.3 Resultados da medição de ferrita delta nos depósitos de solda efetuados

4.1.3.1 Medição realizada com aparelho ferritoscópico

Foram obtidos os seguintes valores de medição de ferrita na medição realizada com o aparelho ferritoscópico marca Ecolmeter.

O valor de FN foi medido ao longo do cordão de solda nas chapas foram:

- Corpo de prova 01 - na faixa de **11,5 – 12,0** para FN;
- Corpo de prova 02 - na faixa de **11,5 – 12,0** para FN;
- Corpo de prova 03 – na faixa de **11,5 – 12,0** para FN.

A figura 43 mostra a execução da medição utilizando o aparelho.



Figura 43: Realização da medição de ferrita delta ao longo do corpo de prova

4.1.3.2 Determinação do número de Ferrita (FN) segundo Delong

Para determinação do número de ferrita segundo Delong, foram calculados os teores de cromo e níquel equivalentes e foram obtidos os seguintes valores no metal de solda:

- Cromo Equivalente = 22,8 %
- Níquel Equivalente = 14,68%

Os resultados foram plotados no diagrama de Delong, e os resultados obtidos foram:

- Corpo de prova 01 – FN aproximado = 14,0
- Corpo de prova 02 – FN aproximado = 14,0
- Corpo de prova 03 – FN aproximado = 14,0

A figura 44 mostra o diagrama de Delong com os valores de cromo equivalente e Níquel equivalente representados no metal de solda.

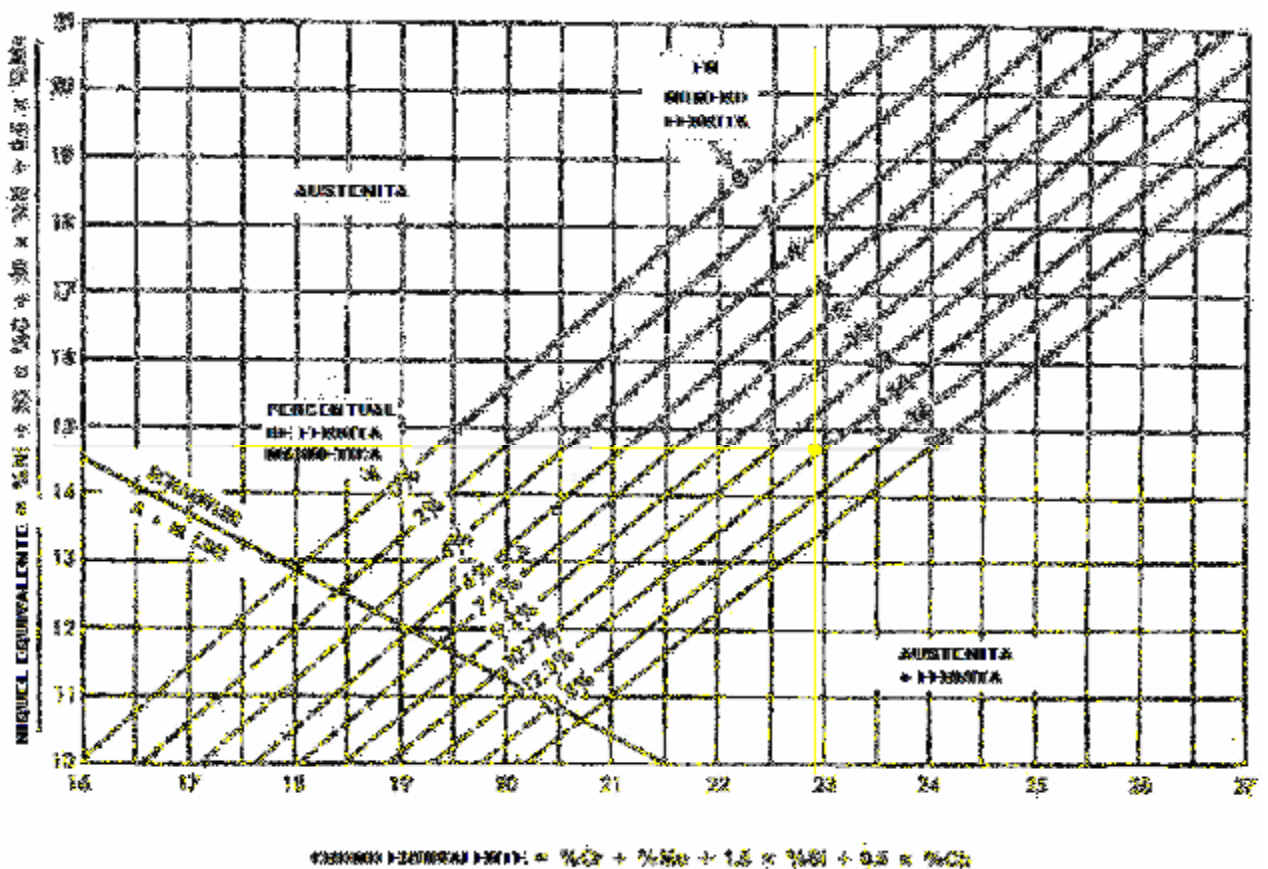


Figura 44: Diagrama de Delong para estimar o número de ferrita (FN).

4.2 Curvas de referência obtidas para cada cabeçote utilizado

Para elaboração das curvas de referência utilizadas para referência de inspeção dos corpos de prova foi utilizado o bloco de referência com espessura de 20 mm e furos de $\varnothing 2,4$ mm.

A seqüência e metodologia aplicada para execução das curvas de referência com cada cabeçote estão estabelecidas no procedimento de ultra-som descrito no apêndice 1 do trabalho.

4.2.1 Cabeçote Duplo Cristal

Foram obtidas as seguintes curvas de referência para o cabeçote duplo cristal marca Krautkramer modelo MSEB 4 com freqüência de 4 MHz.

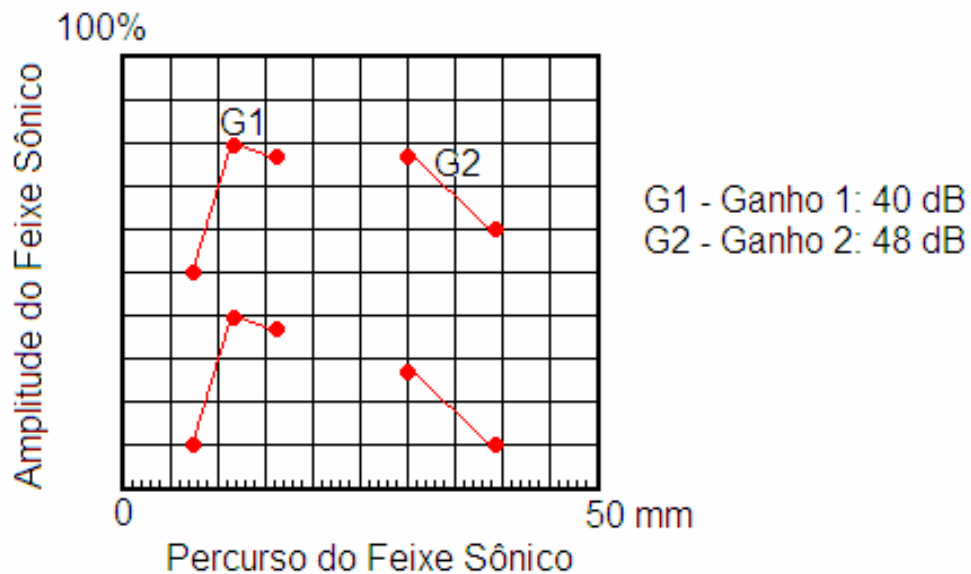


Figura 45: Curva de referência para inspeção dos corpos de prova através do cabeçote duplo-cristal MSE B 4 com freqüência de 4 MHz

Foi possível estabelecer as curvas de referência primária e de 50% da amplitude do sinal conforme descrito no procedimento de ultra-som, através do posicionamento do cabeçote nas posições 1 a 5, conforme figura 2 da página 104 do apêndice 01 .

Na transição das posições 3 e 4 houve uma redução significativa da amplitude do eco em função do aumento do percurso do feixe sônico do cabeçote.

Em função desta redução da amplitude do sinal do eco, o ganho de referência teve que ser acrescido de 40 dB para 48 dB nas posições 4 e 5 conforme mostra a curva de referência.

Não foi possível estabelecer a curva de referência com amplitude de sinal de 20% em nenhuma das posições. Quando da redução da amplitude do sinal em 14

dB em relação ao ganho primário, a amplitude do sinal apresentou redução próxima ou igual a zero.

A não obtenção da curva de referência primária com amplitude de sinal de 20% inviabiliza a execução do ensaio segundo os requisitos contidos no código ASME. Segundo determina o critério de aceitação contido no código ASME VIII, esta curva de referência é utilizada como parâmetro inicial de aprovação ou rejeição da descontinuidade avaliada.

4.2.2 Cabeçote Angular de 45°

Foram obtidas as seguintes curvas de referência para o cabeçote angular de 45° marca Krautkramer modelo MWB 45-4 com frequência de 4 MHz.

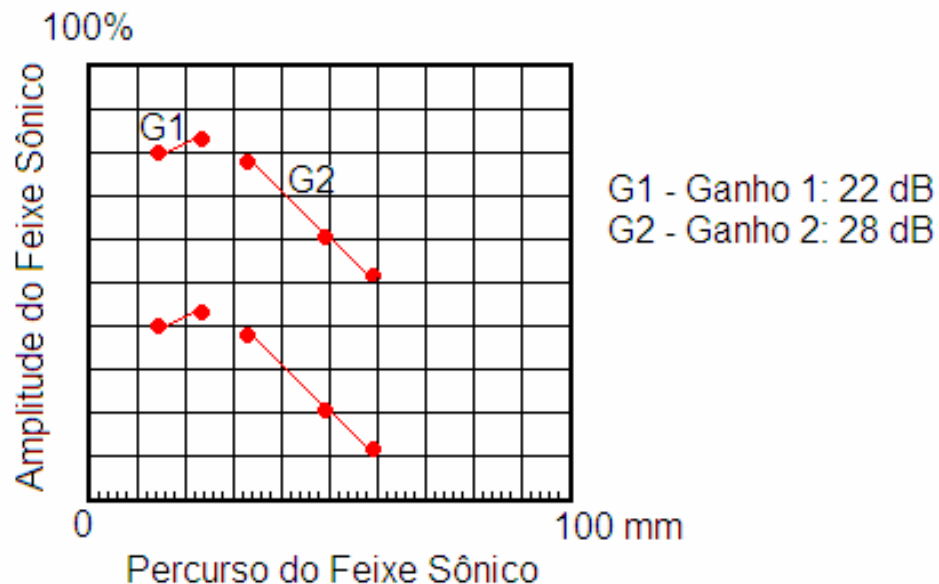


Figura 46: Curva de referência para inspeção dos corpos de prova através do cabeçote angular de 45° modelo MWB 45-4 com frequência de 4 MHz

Foi possível estabelecer as curvas de referência primária e de 50% da amplitude do sinal conforme descrito no procedimento de ultra-som, através do posicionamento do cabeçote nas posições 1 a 5, conforme figura 3 da página 104 do apêndice 01 .

Na transição das posições 2 e 3 houve uma redução significativa da amplitude do eco em função do aumento do percurso do feixe sônico do cabeçote.

Em função desta redução da amplitude do sinal do eco, o ganho de referência teve que ser acrescido de 22 dB para 28 dB nas posições 3, 4 e 5 conforme mostra a curva de referência.

Não foi possível estabelecer a curva de referência com amplitude de sinal de 20% em nenhuma das posições. Quando da redução da amplitude do sinal em 14 dB em relação ao ganho primário, a amplitude do sinal apresentou redução próxima ou igual a zero.

A não obtenção da curva de referência primária com amplitude de sinal de 20% inviabiliza a execução do ensaio segundo os requisitos contidos no código ASME. Segundo determina o critério de aceitação contido no código ASME VIII, esta curva de referência é utilizada como parâmetro inicial de aprovação ou rejeição da descontinuidade avaliada.

4.2.3 Cabeçote Angular de 60°

Foram obtidas as seguintes curvas de referência para o cabeçote angular de 60° marca Krautkramer modelo MWB 60-4 com frequência de 4 MHz.

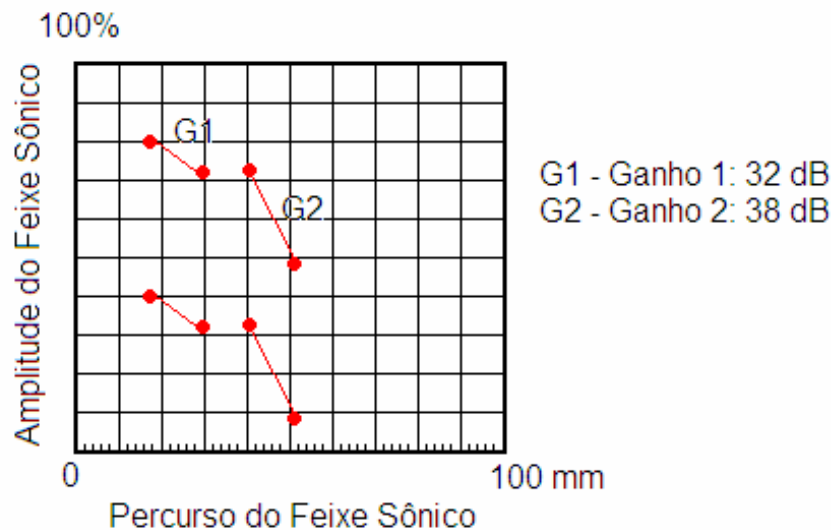


Figura 47: Curva de referência para inspeção dos corpos de prova através do cabeçote angular de 60° modelo MWB 60-4 com frequência de 4 MHz

Foi possível estabelecer as curvas de referência primária e de 50% da amplitude do sinal conforme descrito no procedimento de ultra-som, através do posicionamento do cabeçote nas posições 1 a 4, conforme figura 3 da página 104 do apêndice 01.

Na transição das posições 2 e 3 houve uma redução significativa da amplitude do eco em função do aumento do percurso do feixe sônico do cabeçote.

Em função desta redução da amplitude do sinal do eco, o ganho de referência teve que ser acrescido de 32 dB para 38 dB nas posições 2 e 3 conforme mostra a curva de referência.

Não foi possível fazer o levantamento da posição 5 da curva de referência. Nesta posição a amplitude do eco não apresentou resposta alguma na tela do aparelho de ultra-som.

Não foi possível estabelecer a curva de referência com amplitude de sinal de 20% em nenhuma das posições. Quando da redução da amplitude do sinal em 14 dB em relação ao ganho primário, a amplitude do sinal apresentou redução próxima ou igual a zero.

A não obtenção da curva de referência primária com amplitude de sinal de 20% inviabiliza a execução do ensaio segundo os requisitos contidos no código ASME. Segundo determina o critério de aceitação contido no código ASME VIII, esta curva de referência é utilizada como parâmetro inicial de aprovação ou rejeição da descontinuidade avaliada.

4.2.4 Cabeçote Angular de 70°

Foram obtidas as seguintes curvas de referência para o cabeçote angular de 70° marca Krautkramer modelo MWB 70-4 com frequência de 4 MHz.

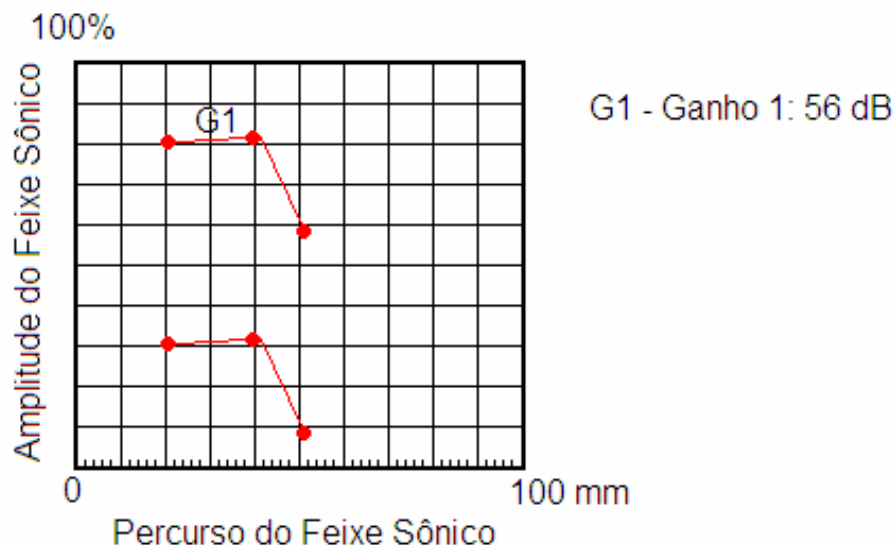


Figura 48: Curva de referência para inspeção dos corpos de prova através do cabeçote angular de 70° modelo MWB 70-4 com frequência de 4 MHz

Foi possível estabelecer as curvas de referência primária e de 50% da amplitude do sinal conforme descrito no procedimento de ultra-som, através do posicionamento do cabeçote nas posições 1 a 3, conforme figura 3 da página 104 do apêndice 01.

Na transição das posições 3 e 4 houve uma redução significativa da amplitude do eco em função do aumento do percurso do feixe sônico do cabeçote.

Em função desta redução da amplitude do sinal do eco, o ganho de referência foi acrescido ao valor máximo permitido pelo aparelho de ultra-som USM II e não foi possível elevar a amplitude da tela do aparelho a valores próximos a 80% da tela.

Em função desta limitação, não foi possível fazer o levantamento da curva primária nas posições 4 e 5 .

Não foi possível estabelecer a curva de referência com amplitude de sinal de 20% em nenhuma das posições. Quando da redução da amplitude do sinal em 14 dB em relação ao ganho primário, a amplitude do sinal apresentou redução próxima ou igual a zero.

A não obtenção da curva de referência primária com amplitude de sinal de 20% inviabiliza a execução do ensaio segundo os requisitos contidos no código ASME. Segundo determina o critério de aceitação contido no código ASME VIII, esta curva de referência é utilizada como parâmetro inicial de aprovação ou rejeição da descontinuidade avaliada.

4.3 Resultados obtidos na execução do ensaio de ultra-som

O ensaio foi executado utilizando-se a técnica do impulso-eco. Para avaliação das juntas soldadas serão utilizadas as curvas de referência estabelecidas no item 4.2.

O laudo das juntas soldadas foi realizado utilizando-se como referência o critério de aceitação definido no código ASME – Seção VIII – Edition 2004, descrito no procedimento de ultra-som contido no apêndice 1 do trabalho.

4.3.1 Utilização do cabeçote duplo-cristal

A realização do ensaio com a utilização do cabeçote duplo-cristal só foi possível de ser realizado em função da remoção do reforço de solda dos corpos de prova e movimentação do cabeçote nesta região.

A figura 49 mostra a realização do ensaio utilizando-se o cabeçote duplo cristal marca Krautkramer modelo MSE B 4 com frequência de 4 MHz.



Figura 49: Realização do ensaio de ultra-som utilizando o cabeçote duplo-cristal com frequência de 4 MHz com movimentação sobre o reforço da solda.

A figura 50 mostra o detalhe dos resultados obtidos no ensaio de ultra-som e as origens dos principais ecos provenientes na tela do aparelho.

É possível notar que, em todas as regiões da solda para os três corpos de prova avaliados, o resultado obtido no ensaio é o mesmo, ou seja, o eco proveniente na tela do aparelho está localizado a 10 mm do percurso sônico com amplitude do eco próximo a 80% da altura da tela. Este eco de reflexão corresponde à espessura dos corpos de prova ensaiados.

A presença de defeitos internos no material não é visualizada em nenhum dos três corpos de prova avaliados. A região de avaliação de possíveis defeitos está compreendida entre o eco do cabeçote e o 1º eco de reflexão do aparelho.

Demais ecos mostrados à direita do 1º eco de reflexão são os chamados ecos múltiplos. Estes ecos de reflexão não são aconselhados para avaliação da junta soldada em função da leve inclinação dos dois cristais do cabeçote em relação à espessura da peça.

A presença destes ecos múltiplos nos resultados dos três corpos de prova avaliados indica que o feixe sônico emitido pelo cabeçote duplo-cristal apresenta boa sensibilidade na inspeção deste tipo de junta soldada avaliada.

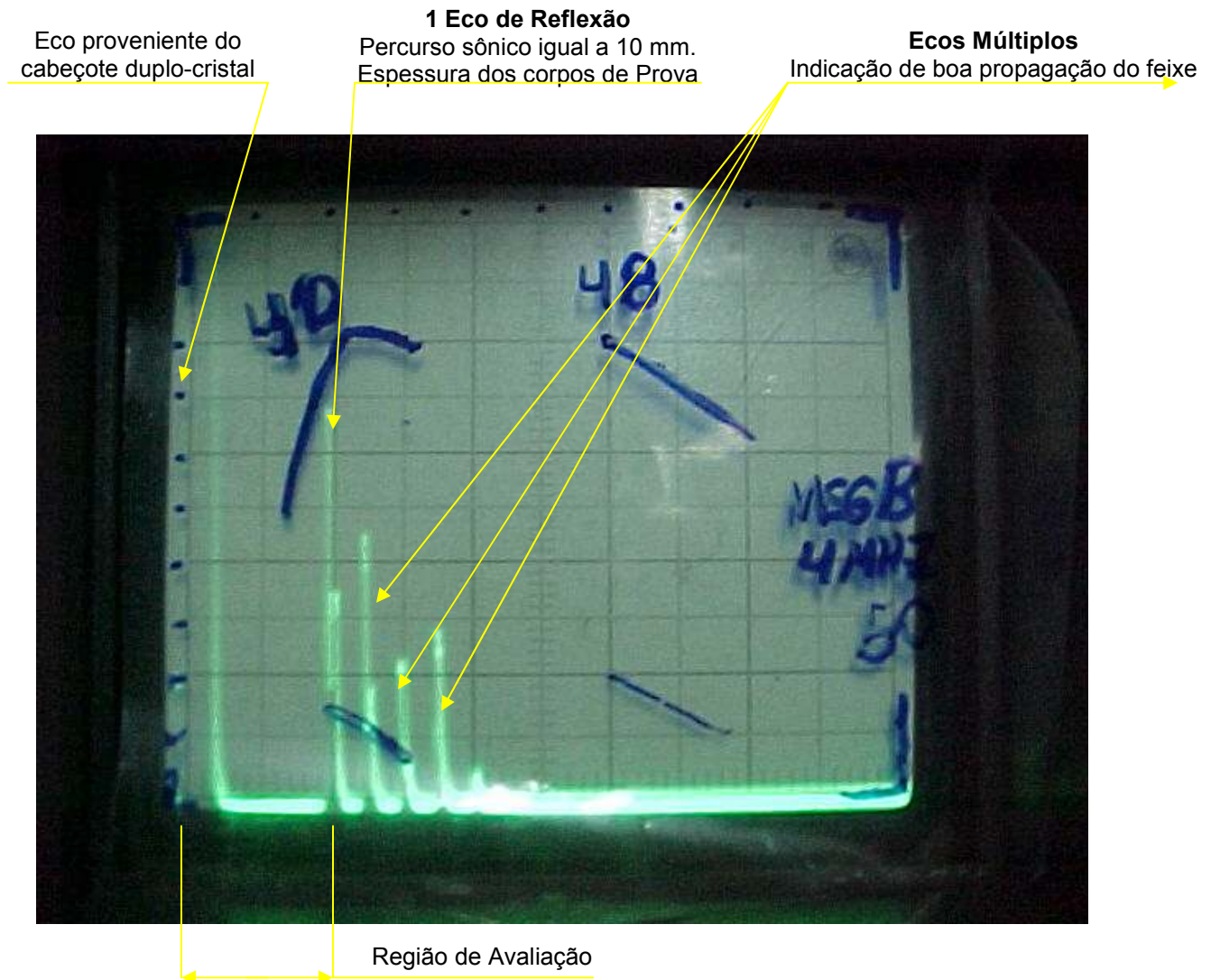


Figura 50: Demonstração dos ecos provenientes da realização do ensaio nos 3 corpos de prova utilizando o cabeçote duplo-cristal. Resultado obtido na tela do aparelho. Localização do 1º eco de reflexão com percurso sônico de 10 mm referente a espessura do corpo de prova ensaiado.

O método aplicado não verificou a presença de defeitos internos na juntas soldadas dos 3 (três) corpos de prova.

4.3.2 Utilização do cabeçote angular de 45°

A execução do ensaio com a utilização do cabeçote angular de 45° foi realizada com a movimentação do cabeçote sobre o metal de base.

A figura 51 mostra a realização do ensaio utilizando-se o cabeçote angular de 45° marca Krautkramer modelo MWB 45-4 com frequência de 4 MHz.



Figura 51: Realização do ensaio de ultra-som no corpo de prova 01 com a utilização do cabeçote de 45° Modelo MWB 45-4. Movimentação do cabeçote sobre o metal de base

A figura 53 mostra o detalhe dos resultados obtidos no ensaio de ultra-som e as origens dos principais ecos provenientes na tela do aparelho.

É possível notar que, em todas as regiões da solda para os três corpos de prova avaliados, o resultado obtido no ensaio é o mesmo, ou seja, o eco proveniente na tela do aparelho está localizado a 14,14 mm do percurso sônico com amplitude do eco próximo a 80% da altura da tela. Este eco de reflexão corresponde à espessura dos corpos de prova ensaiados.

Esta distância de 14,14 mm do percurso sônico do primeiro eco de reflexão da tela do aparelho foi obtida em função das condições do ensaio e do ângulo de inclinação do feixe sônico.

A figura 52 mostra o comportamento do feixe sônico para os corpos de prova analisados com o cabeçote de 45°.

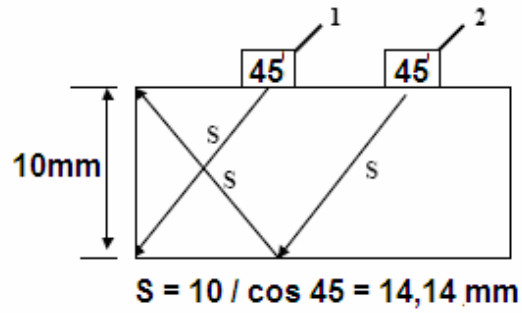


Figura 52: Comportamento do feixe ultra-sônico do cabeçote de 45° nos corpos de prova avaliados. Percurso sônico igual a 14,14 mm.

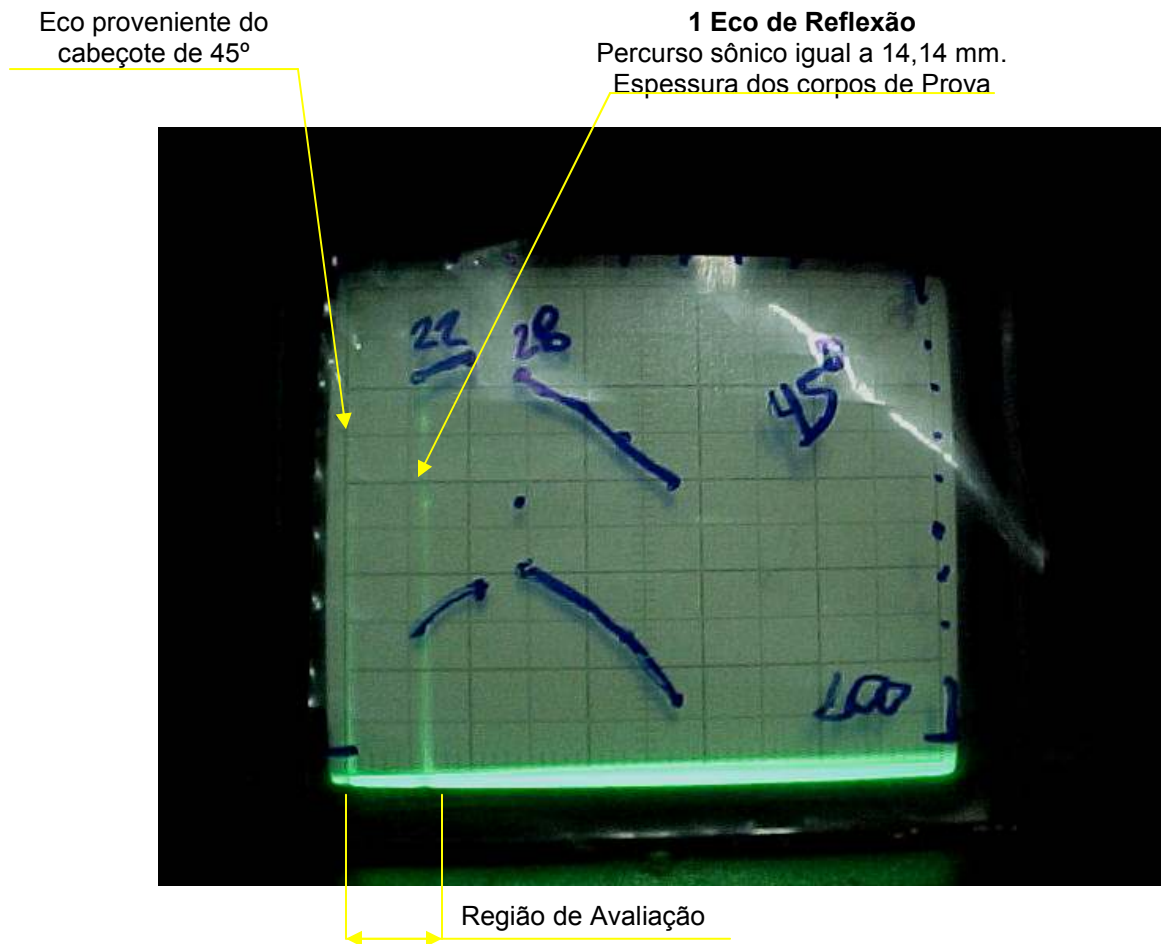


Figura 53: Demonstração dos ecos provenientes da realização do ensaio nos 3 corpos de prova utilizando o cabeçote de 45°. Resultado obtido na tela do aparelho. Localização do 1º eco de reflexão com percurso sônico de 14,14 mm referente a espessura do corpo de prova ensaiado.

A presença de defeitos internos no material não é visualizada em nenhum dos três corpos de prova avaliados. A região de avaliação de possíveis defeitos está compreendida entre o eco do cabeçote e o 1º eco de reflexão do aparelho.

Nota-se que para o cabeçote de ultra-som com ângulo de inclinação de 45° não aparecem os ecos múltiplos provenientes do ensaio.

A não obtenção destes ecos múltiplos indica que a onda ultra-sônica gerada pelo cabeçote no ângulo de incidência de 45° não apresenta boa sensibilidade na inspeção deste tipo de junta soldada.

O método aplicado não verificou a presença de defeitos internos na juntas soldadas dos 3 (três) corpos de prova.

4.3.3 Utilização do cabeçote angular de 60°

A execução do ensaio com a utilização do cabeçote angular de 60° foi realizada com a movimentação do cabeçote sobre o metal de base.

A figura 54 mostra a realização do ensaio utilizando-se o cabeçote angular de 60° marca Krautkrmaer modelo MWB 60-4 com frequência de 4 MHz.



Figura 54; Realização do ensaio de ultra-som com o cabeçote de 60°

A figura 56 mostra o detalhe dos resultados obtidos no ensaio de ultra-som e as origens dos principais ecos provenientes na tela do aparelho.

É possível notar que, em todas as regiões da solda para os três corpos de prova avaliados, o resultado obtido no ensaio é o mesmo, ou seja, o eco proveniente na tela do aparelho está localizado a 20,00 mm do percurso sônico com amplitude

do eco próximo a 80% da altura da tela. Este eco de reflexão corresponde à espessura dos corpos de prova ensaiados.

Esta distância de 20,00 mm do percurso sônico do primeiro eco de reflexão da tela do aparelho foi obtida em função das condições do ensaio e do ângulo de inclinação do feixe sônico.

A figura 55 mostra o comportamento do feixe sônico para os corpos de prova analisados com o cabeçote de 60°.

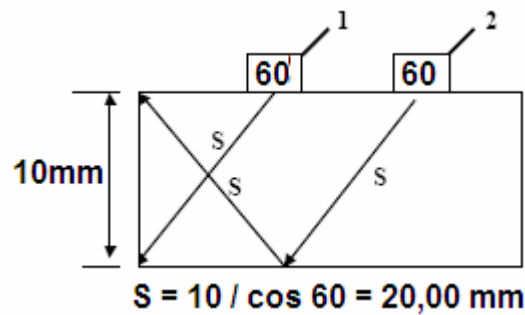


Figura 55: Comportamento do feixe ultra-sônico do cabeçote de 60° nos corpos de prova avaliados. Percurso sônico igual a 20,00 mm.

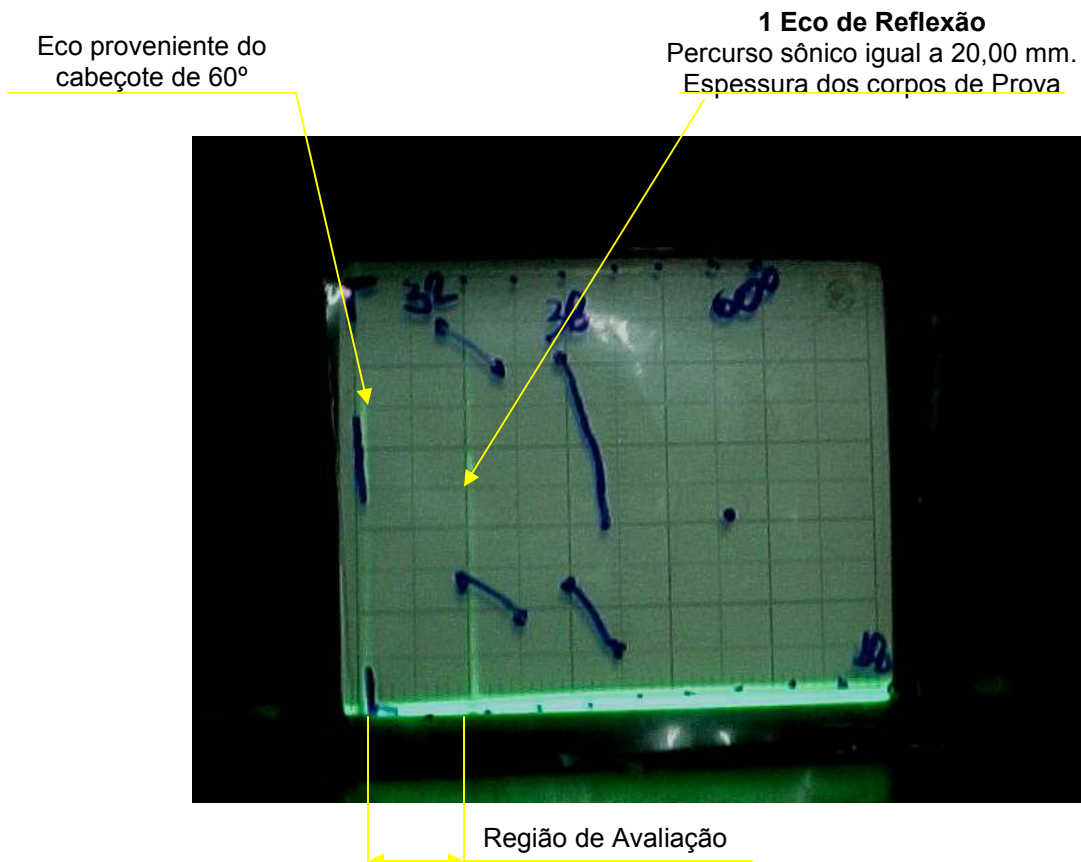


Figura 56: Demonstração dos ecos provenientes da realização do ensaio nos 3 corpos de prova utilizando o cabeçote de 60°. Resultado obtido na tela do aparelho. Localização do 1º eco de reflexão com percurso sônico de 20,0 mm referente a espessura do corpo de prova ensaiado.

A presença de defeitos internos no material não é visualizada em nenhum dos três corpos de prova avaliados. A região de avaliação de possíveis defeitos está compreendida entre o eco do cabeçote e o 1º eco de reflexão do aparelho.

Nota-se que para o cabeçote de ultra-som com ângulo de inclinação de 60° não aparecem os ecos múltiplos provenientes do ensaio.

A não obtenção destes ecos múltiplos indica que a onda ultra-sônica gerada pelo cabeçote no ângulo de incidência de 60° não apresenta boa sensibilidade na inspeção deste tipo de junta soldada.

O método aplicado não verificou a presença de defeitos internos na juntas soldadas dos 3 (três) corpos de prova.

4.3.4 Utilização do cabeçote angular de 70°

A execução do ensaio com a utilização do cabeçote angular de 70° foi realizada com a movimentação do cabeçote sobre o metal de base.

A figura 57 mostra a realização do ensaio utilizando-se o cabeçote angular de 70° marca Krautkramer modelo MWB 70-4 com frequência de 4 MHz.



Figura 57 - Realização do ensaio de ultra-som com o cabeçote de 70°

A figura 59 mostra o detalhe dos resultados obtidos no ensaio de ultra-som e as origens dos principais ecos provenientes na tela do aparelho.

É possível notar que, em todas as regiões da solda para os três corpos de prova avaliados, o resultado obtido no ensaio é o mesmo, ou seja, o eco proveniente

na tela do aparelho está localizado a 29,23 mm do percurso sônico com amplitude do eco próximo a 80% da altura da tela. Este eco de reflexão corresponde à espessura dos corpos de prova ensaiados. Esta distância de 29,23 mm do percurso sônico do primeiro eco de reflexão da tela do aparelho foi obtida em função das condições do ensaio e do ângulo de inclinação do feixe sônico.

A figura 58 mostra o comportamento do feixe sônico para os corpos de prova analisados com o cabeçote de 70°.

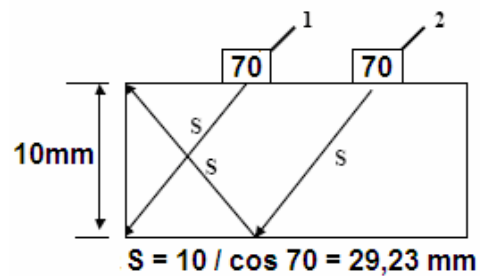


Figura 58: Comportamento do feixe ultra-sônico do cabeçote de 70° nos corpos de prova avaliados. Percurso sônico igual a 29,23 mm.

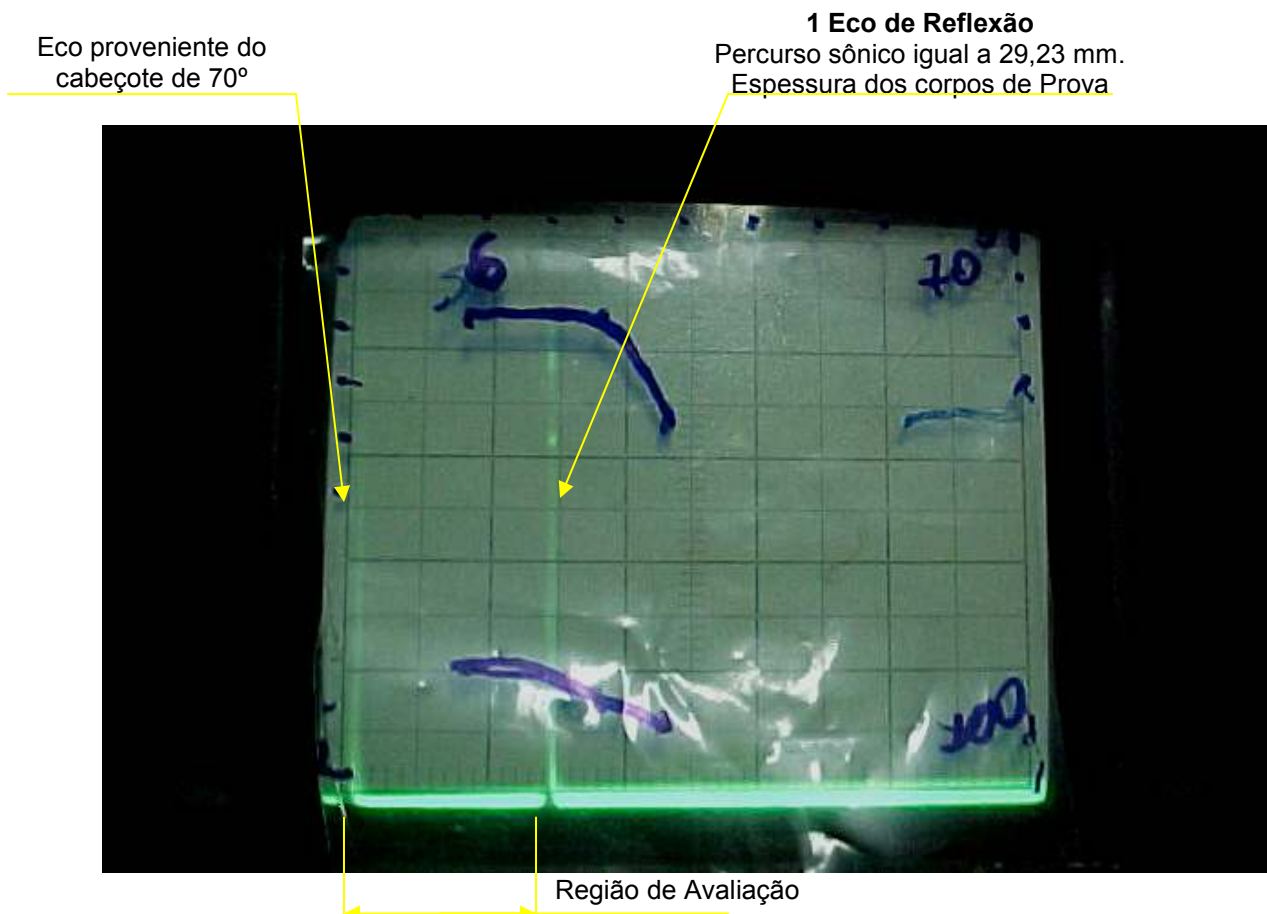


Figura 59: Demonstração dos ecos provenientes da realização do ensaio nos 3 corpos de prova utilizando o cabeçote de 70°. Resultado obtido na tela do aparelho. Localização do 1º eco de reflexão com percurso sônico de 29,23 mm referente a espessura do corpo de prova ensaiado.

A presença de defeitos internos no material não é visualizada em nenhum dos três corpos de prova avaliados. A região de avaliação de possíveis defeitos está compreendida entre o eco do cabeçote e o 1º eco de reflexão do aparelho.

Nota-se que para o cabeçote de ultra-som com ângulo de inclinação de 70° não aparecem os ecos múltiplos provenientes do ensaio.

A não obtenção destes ecos múltiplos indica que a onda ultra-sônica gerada pelo cabeçote no ângulo de incidência de 70° não apresenta boa sensibilidade na inspeção deste tipo de junta soldada.

O método aplicado não verificou a presença de defeitos internos nas juntas soldadas dos 3 (três) corpos de prova.

4.4 Resultados obtidos no ensaio de gamagrafia

Os ensaios de gamagrafia foram realizados pela empresa Engisa Inspeção e Pesquisa Aplicada a Indústria Ltda utilizando-se uma fonte de Iridio 192 com atividade de 28,75 Ci.

Para determinação da sensibilidade de imagem foram utilizados (IQI's) Indicadores de qualidade de imagem 10 ISO 16.

O procedimento utilizado para o ensaio foi o END 003 revisão 10.

Para uma possível localização dos defeitos encontrados, cada corpo de prova foi marcado com os números 0 e 1, conforme mostra a figura 60.



Figura 60 - Marcação realizada nos corpos de prova para facilitar a localização de possíveis defeitos

O laudo foi realizado pelo inspetor de radiografia Tarcísio Spring, credenciado junto ao Sistema Nacional de Qualificação e Certificação, SNQC, através do número 1228 para a técnica de Gamagrafia.

Foram obtidos os seguintes resultados:

Corpo de prova 01 – Reprovado – Presença de defeitos como falta de fusão e porosidade. A figura 61 mostra o aspecto geral da imagem radiográfica obtida.



Figura 61 – Imagem radiográfica obtida no corpo de prova 01.

A figura 62 mostra a localização dos defeitos de soldagem encontrados na imagem radiográfica do corpo de prova 01.

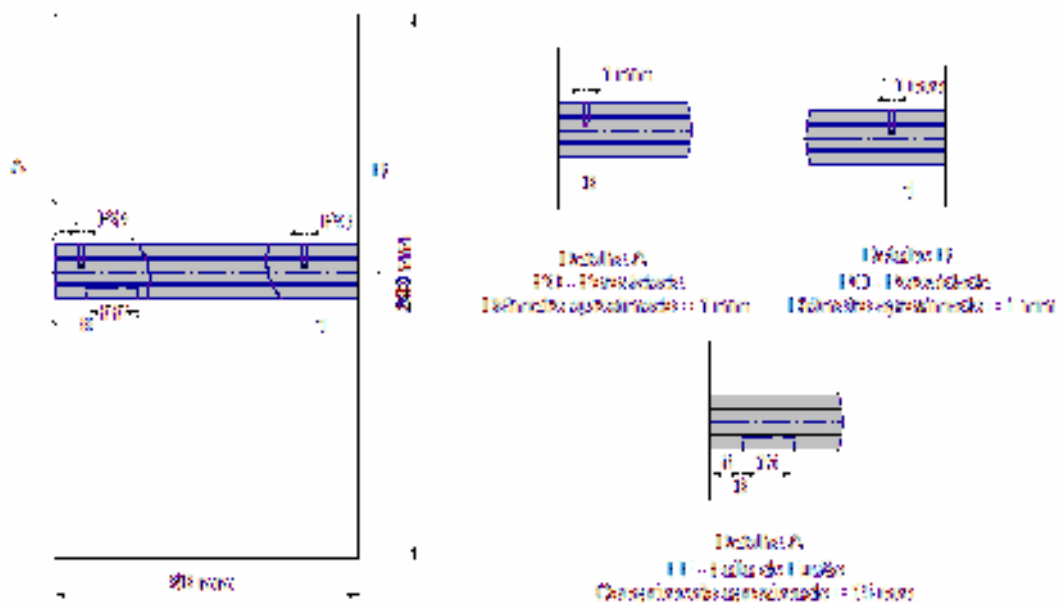


Figura 62: Localização dos defeitos de soldagem encontrados no corpo de prova 01

Corpo de prova 02 – Aprovado – Presença de descontinuidades como porosidade e mordedura interna. As descontinuidades encontradas estão em dimensões aceitáveis segundo o critério de aceitação estabelecido no código ASME VIII Divisão 1.

A figura 63 mostra a imagem radiográfica obtida no corpo de prova 02.



Figura 63 – Imagem radiográfica obtida no corpo de prova 02.

A figura 64 mostra a localização dos defeitos de soldagem encontrados na imagem radiográfica do corpo de prova 02.

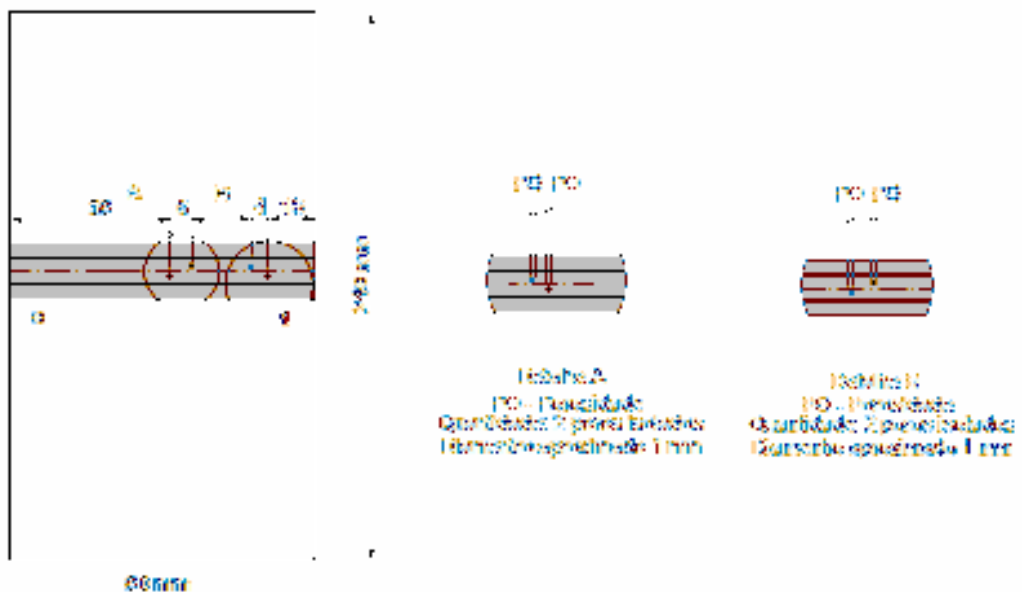


Figura 64: Localização dos defeitos de soldagem encontrados na imagem radiográfica.

Corpo de prova 03 – Aprovado – Isento de descontinuidades internas;

A figura 65 mostra a imagem radiográfica obtida no corpo de prova 03.



Figura 64 – Imagem radiográfica obtida no corpo de prova 03.

Os filmes de todas as imagens radiográficas obtidas nos 3 (três) corpos de prova radiografados assim como o laudo realizado estão colocadas no apêndice 3 do trabalho.

4.5 Comparação dos resultados obtidos no ensaio de ultra-som x Gamagrafia

Através da comparação dos resultados obtidos é possível afirmar que método de ultra-som aplicado não apresenta confiabilidade.

Os defeitos de soldagem encontrados no ensaio de gamagrafia não foram detectados pelo ensaio de ultra-som.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados experimentais obtidos na execução do ensaio de ultra-som convencional, permite-se, para as condições aplicadas a este trabalho, concluir que:

1. A análise da composição química do material e o número de ferrita “ δ ” medidos e obtidos através do gráfico de DeLong comprovam que o material avaliado cumpre os requisitos do aço AISI 316.

2. O Procedimento de ultra-som elaborado segundo os requisitos estabelecidos no código ASME V – Edição 2004, não apresenta confiabilidade para execução do método dentro dos parâmetros utilizados no trabalho.

3. As curvas de referências com amplitude de sinal de 20%, não foram obtidas em todos os cabeçotes de ultra-som utilizados no trabalho. A não obtenção destas curvas de referência inviabiliza a avaliação do método segundo os requisitos estabelecidos no critério de aceitação definido no código ASME Seção VIII, que estabelece:

- Toda descontinuidade que produzir amplitude maior que 20% do nível de referência devem ser pesquisadas em uma extensão que permita ao inspetor determiná-la, identificá-la e localizá-la dentro dos padrões padrões de aceitação estabelecidos em nos itens b e c.

4. A aplicação do método com a utilização do cabeçote duplo-cristal, através da incidência normal de ondas longitudinais na junta soldada, apresentou maior sensibilidade em relação aos cabeçotes angulares que geram a incidência oblíqua de ondas transversais. Esta sensibilidade pode estar associada aos seguintes pontos:

- Os cabeçotes de ultra-som do tipo duplo-cristal apresentam menor percurso sônico comparado aos cabeçotes do tipo angular, tendo em vista

que o feixe ultra-sônico gerado no interior da junta soldada avaliado é do tipo reto ou normal.

- A diminuição do percurso sônico reduz o fenômeno do fator de atenuação nos cabeçotes. Isto pode ser observado na obtenção das curvas de referência de todos os cabeçotes utilizados na pesquisa. Quando do posicionamento dos cabeçotes nas posições 4 e 5 dos blocos de referência, posições onde o percurso sônico da onda ultra-sônica é maior, não foi possível obter o eco de reflexão dos furos de $\varnothing 2,4$ mm.

5. Os defeitos internos nos Corpos de Prova 01 e 02, verificados através da técnica de gamagrafia industrial, utilizada como método comparativo, não foram detectados pelo método do ultra-som. Tais defeitos como falta de fusão são inaceitáveis segundo o critério de aceitação do código ASME VIII em qualquer tamanho e localização.

Com base nos resultados obtidos em toda pesquisa é possível concluir que o método convencional de ensaio por ultra-som em juntas soldadas de aços inoxidáveis austeníticos do tipo AISI 316 não apresenta confiabilidade.

Capítulo 6

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para futuros trabalhos, podem-se sugerir os seguintes:

- Determinação da influência do número de ferrita “ δ ” (FN) na propagação da onda ultra-sônica nos diversos tipos de materiais inoxidáveis austeníticos;
- Desenvolvimento de novos cabeçotes do tipo angular e duplo-cristal que trabalhem com ondas longitudinais e com frequências elevadas, superiores aos cabeçotes comercialmente utilizados na indústria. Este aumento da frequência, associado à incidência de ondas longitudinais no material avaliado, pode aumentar significativamente a sensibilidade do método a detecção de descontinuidades e ou defeitos de tamanho reduzido.
- Estudo da influência dos diversos tipos de cristais piezoelétricos na propagação do feixe sônico nos diversos tipos de materiais austeníticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ANDREUCCI, R.: **Ensaio de ultra-som**. São Paulo. Editora Abende, 7-43, Julho de 2003.

[2] SANTIN, J. L.; **Ultra-som técnica e aplicação**. Curitiba. Editora Qualymark, 11-48, 119-126, 233-251, Edição 1996.

[3] LOBERTO, B. **Apostila de ultra-som**. Disciplina de Ensaaios não Destrutivos. Cefet / Pr, 21-29, Edição 1981.

[4] KRAUTKRAMER J. **Ensayos no destructivos por la técnica de ultrasonido industrial**. México. 1981

[5] TELLES, P. S.: **Vasos de Pressão**. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. Edição 1991.

[6] ASM SPECIALITY HANDBOOK. **“Stainless Steels”**. First edition, Materials Park, 1994.

[7] METALS HANDBOOK, V1; **“Properties and selection. Irons, steels and high performance alloys”**. 10a ed, Materials Park, OH, USA, ASM 1990.

[8] MODENESI, PAULO J.; MARQUES, PAULO V; DOS SANTOS, DABERTO B. **“Curso de Metalurgia da Soldagem”**, UFMG, 1982.

[9] PADILHA, A. F.; GUEDES L. **Aços inoxidáveis austeníticos**. São Paulo. Hemus Editora, 1994.

[10] SILVA, M. J. G. **Estudo da temperatura de solubilização de aços inoxidáveis austeníticos ASTM A 312 TP321 para operação em indústria petroquímica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza 2001.

[11] KOTECKI, D. J. **Extension of the WRC Ferrite Number System.** *Welding Journal* 61(11): 352-s to 361-s, 1982.

[12] SEDRICKS, A. J.; **Corrosion of Stainless Steel.** Wiley-interscience Publications, second edition, New York, USA, 1996.

[13] HONEYCOMBE, R.H, DICKINSON, D. W., BHADESHIA, H. K. D. H. **Steels: microstructure and properties**, second edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA 1995.

[14] LEITE, P. P. G. **Curso de Ensaio não Destrutivos.** ABM, São Paulo / SP, 1996.

[15] MORAIVA, G. **Handbook of Radiographic Apparatus and Techiques**, second edition, The International Institute of Welding, Englang, 1973.

[16] ALLENSTEIN, C. L. M., LOBERTO. B., NOGOSECKI, W. **Apostila de Raios-X.** Cefet-PR, 1976.

[17] KODAK, E. **Radiography in Modern Industry.** New York, 25-s to 31-s, 1957.

[18] ENGISA. **Procedimento de Ensaio Radiográfico END 003 revisão 9.** Pinhais / PR, 2006.

**APENDICE 01 – PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO DO ENSAIO DE ULTRA-SOM
EM JUNTAS SOLDADAS DE TOPO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316**

ÍNDICE

1. Objetivo
 2. Normas de Referência
 3. Material (metal de base e adição) e espessuras
 4. Desenhos com detalhes dimensionais da solda
 5. Aparelhos
 6. Cabeçotes
 7. Técnicas a serem utilizadas
 8. Método e periodicidade de calibração da aparelhagem
 9. Método de calibração da escala de distância e da sensibilidade
 10. Ajuste da sensibilidade do aparelho
 11. Condição superficial e técnica de preparação
 12. Acoplante
 13. Técnica de varredura
 14. Requisitos Adicionais
 15. Critérios de registro e aceitação de descontinuidades
 16. Formulário para relatório de registro de resultados
- Anexo 1.

1. Objetivo: Estabelecer as condições exigíveis na realização do ensaio não destrutivo por meio de ultra-som em juntas soldadas de aços inoxidáveis austeníticos do tipo AISI 316.

2. Normas de Referência

- N-1590d Ensaio não destrutivo – qualificação de pessoal;
- N-1738 Descontinuidades em juntas soldadas, fundidos, forjados e laminados;
- N-1594d Ensaio não destrutivo – Ultrassom;
- DIN-54120 Non Destructive Testing – Calibration Block 1 and its use for adjustment and control of ultrasonic echo equipment;
- DIN-54122 Non Destructive Testing – Calibration Block 2 and its use for adjustment and control of ultrasonic echo equipment;

- BS-4331 Part 1: Methods for assessing performance characteristics of ultrasonic flaw detection equipment;
- BS-4331 Part 3: Methods for assessing performance characteristics of ultrasonic flaw detection equipment;
- ASME Section V, division 1 – Edition 2004.

3. Material e faixa de espessura

Material: AISI 316;

Faixa de espessuras: 10 a 20 mm.

4. Desenhos com detalhes dimensionais de uma junta soldada de topo

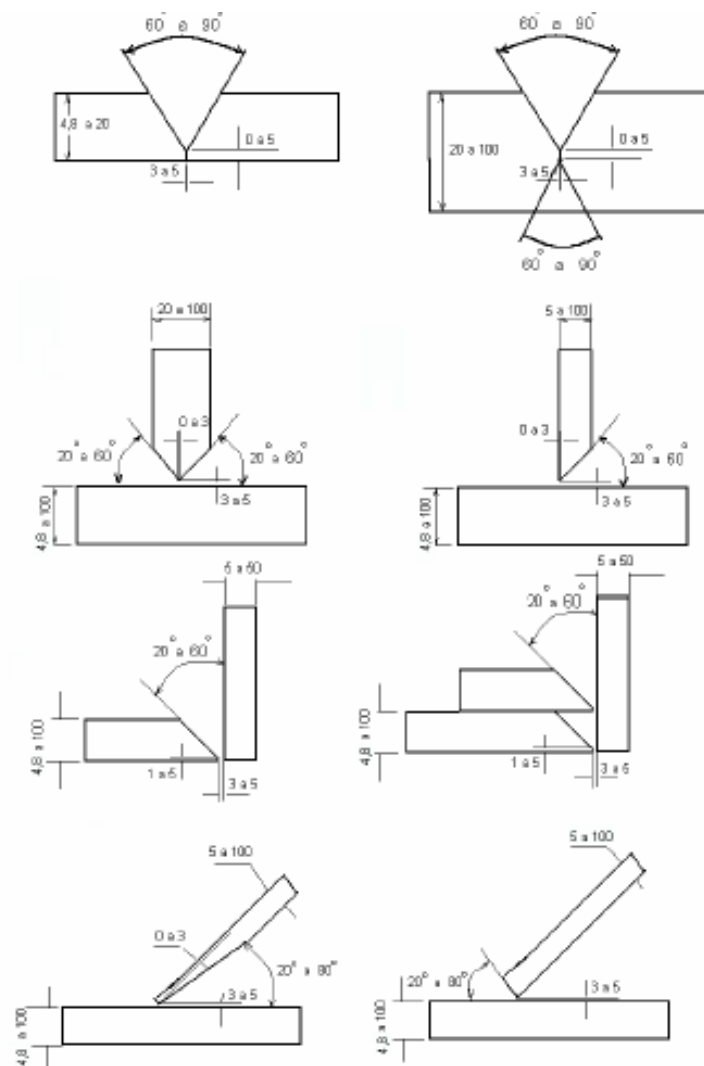


Figura 1; Detalhes dimensionais das juntas soldadas

5. Aparelhos

| FABRICANTE | MODELO | TIPO |
|-------------|------------------|-----------|
| Krautkramer | USM 2 | Pulso-eco |
| Krautkramer | USK 6 | Pulso-eco |
| Krautkramer | USK 7 | Pulso-eco |
| Krautkramer | USN 50 | Pulso-eco |
| Krautkramer | USN 52 | Pulso-eco |
| Krautkramer | USM 20 | Pulso-eco |
| Panametrics | EPOCHI II / III | Pulso-eco |
| Sonatest | SITESCAN 130/230 | Pulso-eco |

6. Cabeçotes

Os cabeçotes não deverão produzir grama excessiva, de modo a permitir a fácil identificação de um eco com altura de 10% da altura total da tela, na sua área de utilização.

Cabeçotes utilizados em superfícies com raio de curvatura inferior a 250 mm, deverão possibilitar ajuste de suas sapatas a superfície.

O ângulo do cabeçote deverá ser escolhido observando os seguintes requisitos:

- Deverá ser compatível com o detalhe dimensional da junta soldada;
- Ser compatível com o tipo de descontinuidade a ser detectada;
- As tabelas 2 e 3 mostram os transdutores angulares que podem ser utilizados e a correlação entre transdutores, aparelhos e faixa de espessura.

| Espessura de Parede (mm) | Ângulo dos cabeçotes (grau) |
|--------------------------|-----------------------------|
| Até 15 mm | 60 e 70 |
| 15,0 mm a 25,0 mm | 45 e 60 Ou 60 e 70 |
| 25,0 a 40,0 mm | 45 e 60 ou 45 e 70 |
| Acima de 40,0 mm | 45 e 60 |

| Modelo | Dimensões (mm) | Freq. (Mhz) | Tipo | Ângulo (graus) | Campo Próximo (mm) | Faixa de Espessura (mm) |
|------------|----------------|-------------|---------|----------------|--------------------|-------------------------|
| B1SN | 24 | 1 | Normal | 0 | 25 | 25 a 100 |
| B2SN | 24 | 2 | Normal | 0 | 45 | 25 a 100 |
| B4SN | 24 | 4 | Normal | 0 | 90 | 25 a 100 |
| MB2SN | 10 | 2 | Normal | 0 | 8 | 15 a 100 |
| MB4SN | 10 | 4 | Normal | 0 | 16 | 15 a 100 |
| K2N | 10 | 2 | Normal | 0 | 8 | 25 a 100 |
| K4N | 10 | 4 | Normal | 0 | 16 | 25 a 100 |
| SE B-4H | 20 | 4 | SE | 0 | 12 | 4,8 a 50 |
| SE B-4H 0° | 20 | 4 | SE | 0 | 25 | 4,8 a 100 |
| MSEB-4H | 10 | 4 | SE | 0 | 10 | 4,8 a 50 |
| MSEB-2H | 10 | 2 | SE | 0 | 10 | 4,8 a 50 |
| WB45N2 | 20 x 22 | 2 | Angular | 45 | 90 | 40 a 100 |
| WB60N2 | 20 x 22 | 2 | Angular | 60 | 90 | 40 a 100 |
| WB70N2 | 20 x 22 | 2 | Angular | 70 | 90 | 40 a 100 |
| MWB45N4 | 8 x 9 | 4 | Angular | 45 | 30 | 8 a 100 |
| MWB60N4 | 8 x 9 | 4 | Angular | 60 | 30 | 8 a 100 |
| MWB70N4 | 8 x 9 | 4 | Angular | 70 | 30 | 8 a 100 |
| MSW QC5 | 6,3 | 5 | Angular | 70 | --- | 4,8 a 12 |

7. Técnica a ser usada

A técnica que será utilizada é a do pulso-eco com ondas longitudinais e transversais.

8. Método e Periodicidade de Calibração da Aparelhagem

Os blocos de referência, blocos padrões, equipamentos e acessório deverão sofrer as seguintes calibrações, segundo os métodos definidos:

- Calibração semanal da linearidade horizontal do aparelho;
- Calibração diária da linearidade do controle de ganho do equipamento;
- Calibração diária do ponto de saída do feixe sônico e do ângulo dos cabeçotes angulares;

- Calibração semanal do perfil do feixe sônico dos cabeçotes;
- Calibração mensal do alinhamento do feixe sônico dos cabeçotes;
- Calibração anual do poder de resolução dos cabeçotes;
- Calibração anual dos blocos padrões e de referência.

9. Método de calibração da escala da distância e da sensibilidade do equipamento

9.1 Bloco padrão

A calibração da escala da distância deverá ser feita com os bloco padrão V1, V2, e ou do bloco do mesmo material a ser inspecionado.

9.2 Bloco de referência

9.2.1 Os ensaios realizados de acordo com o código ASME Seção V.

- A calibração da sensibilidade e traçagem da curva de referência deverá ser efetuada em um bloco de referência como mostrado na figura 2, o qual deverá ser confeccionado de material, proveniente do mesmo processo de fabricação (fundido, forjado, laminado, etc..) e sofrer o mesmo tratamento térmico do material a ensaiar.
- Quando duas ou mais espessuras comporem a mesma junta soldada, utilizar como referência a menor espessura;
- Se a varredura for efetuada numa superfície cilíndrica, numa direção ortogonal ao eixo desta, e a superfície de contato tiver um diâmetro externo de curvatura menor ou igual a 500 mm, o diâmetro externo da curvatura do bloco de referência deverá ser o mesmo da superfície de contato. A tolerância no diâmetro externo de curvatura da superfície a ser inspecionada é de 0,9 a 1,5 vezes o diâmetro do bloco de referência.

| Espessura de Parede (mm) | Espessura do bloco básico de calibração (mm) | Diâmetro do furo (mm) |
|--------------------------|--|-----------------------|
| De 4,8 a 25 | 20 ou "t" | 2,4 |
| Acima de 25 até 50 | 38 ou "t" | 3,2 |
| Acima de 50 até 100 | 75 ou "t" | 4,8 |

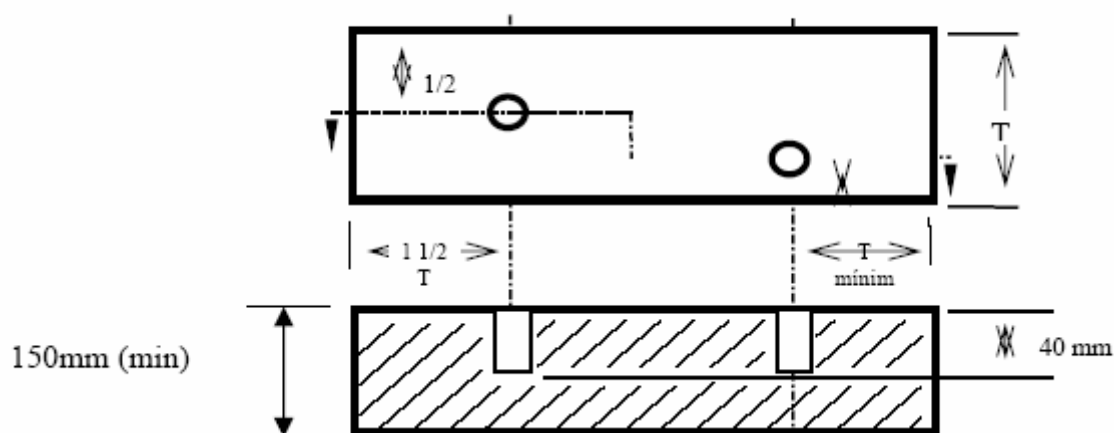


Figura 2: Bloco de referência para calibração da sensibilidade e traçagem da curva de referência

9.3 Curva de Referência para cabeçotes normal e Duplo-Cristal

A curva de referência deve ser feita conforme seguinte seqüência:

1. Posicionar o cabeçote de modo a maximizar o eco de fundo que proporcione maior amplitude.
2. Ajusta o controle de ganho de modo a se obter deste furo uma indicação de 80% de altura da tela, marcando o pico desta indicação na tela. Este ganho é chamado ganho primário.
3. Sem alterar o ganho, posicionar o cabeçote sobre os demais furos marcando as respectivas amplitudes na tela.
4. Interligar as marcações de modo a obter a curva de referência primária.
5. Traçar as curvas de 50% e 20% da amplitude da curva de referência primária, reduzindo-se o ganho em 6 e 14 dB em relação ao ganho primário.
6. O posicionamento do cabeçote e a construção das curvas, estão demonstrados na figura 3.

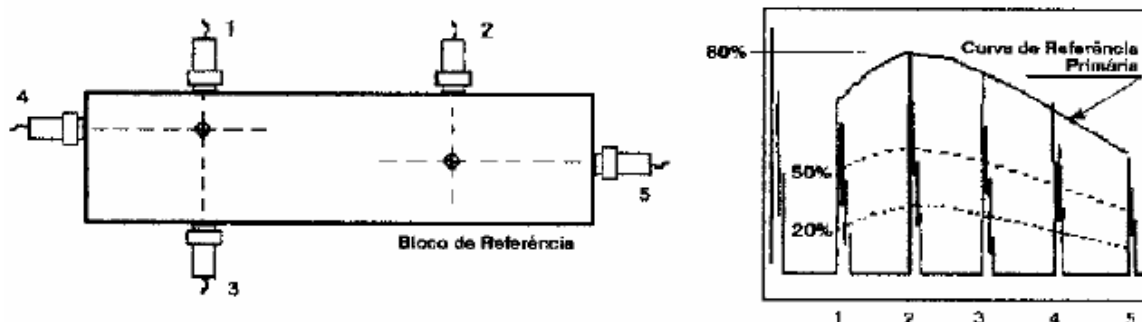


Figura 3: Seqüência de construção da curva de referência para cabeçotes duplo-cristal

9.4 Curva de referência para cabeçotes angulares

A construção das curvas de referência para cabeçotes angulares deverá ser feita conforme seqüência abaixo.

1. Posicionar o cabeçote de modo a maximizar o eco do furo que proporcione a maior amplitude.
2. Ajustar o controle de ganho de modo a se obter deste furo uma indicação com 80% da altura da tela do aparelho, este ganho é chamado de ganho primário.
3. Sem alterar o ganho, posicionar o cabeçote de modo a se obter a resposta nas demais posições, marcando as amplitudes na tela.
4. Interligar as marcações de modo a se obter a curva de referência primária.
5. Traçar as curvas de 50% e 20% da amplitude da curva de referência primária, reduzindo-se o ganho em 6 e 14 dB em relação ao ganho primário.

Os posicionamentos do cabeçote e a construção das curvas de referência primária estão demonstrados na figura 4.

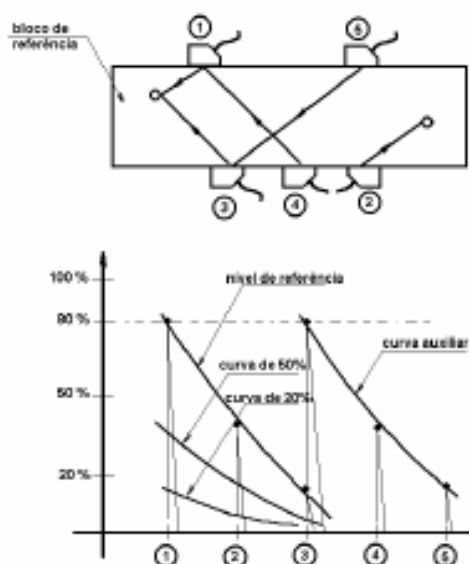


Figura 4: Seqüência de construção da curva de referência para cabeçotes angulares

9.5 Curva de Referência Auxiliar

A construção da curva de referência auxiliar deve ser feita na seqüência abaixo, quando os últimos pontos ficarem abaixo de 20% da altura da tela.

1. Selecionar no bloco de referência o primeiro eco cuja altura seja igual ou inferior a 20% da altura da tela.

2. Elevar este eco a 80% da altura da tela utilizando-se o controle de ganho (este ganho é chamado ganho auxiliar).
3. Sem alterar o ganho, obter os ecos dos furos, com percursos maiores, marcando suas amplitudes na tela.
4. Interligar as marcações de modo a se obter curvas de referência auxiliar.
5. O Posicionamento dos cabeçotes e a construção das ondas de referência auxiliar, estão demonstrados na figura 4.

9.6 Área de avaliação da Curva de Referência

A área da curva de referência entre o zero da escala e o ponto “1” não deverá ser utilizada para avaliação de descontinuidades. Não há, entretanto nenhum inconveniente em utilizá-la para detecção de descontinuidades, as quais devem, porém, ser avaliadas dentro da região útil da curva de referência, conforme mostra a figura 4.

10. Ajuste da Sensibilidade

10.1 Cabeçote Normal e Duplo Cristal

A correção devido a perda por transferência para cabeçotes normais e duplo cristal deverá ser executada da seguinte forma:

1. Maximizar um eco de fundo do bloco de referência e com auxílio do controle de ganho, posiciona-lo a 80% da altura da tela do aparelho.
2. Com o mesmo ganho, posicionar o cabeçote na peça a ser examinada.
3. Verificar a diferença da altura dos ecos em decibéis, sendo esta diferença denominada perda por transferência (PT), que deverá ser acrescida ou diminuída no ganho primário.
4. O ganho resultante é denominado ganho corrigido ($GC = GP + \text{ou} - PT$).

10.2 Cabeçotes angulares

A correção devido a perda por transferência para cabeçotes angulares deverá ser executada da seguinte forma:

1. Utilizar dois cabeçotes do mesmo ângulo, frequência, tipo e fabricante, um corpo emissor, o outro como receptor no bloco de referência de espessura escolhida para inspeção.

2. Os cabeçotes deverão ser posicionados conforme figura 5, de modo a se obter o sinal E/R1, sendo o sinal maximizado e colocado a 80% da altura da tela.
3. Sem alterar o ganho, os sinais das posições E/R2 e E/R3 devem ser marcados na tela.
4. Interligar os pontos ER/1 e ER/3 obtendo uma curva sobre a tela.
5. Com o mesmo ganho, posiciona-se os cabeçotes na peça a ser examinada (conforme figura 5), na posição E/P1 e se a altura do eco deste posicionamento for igual a altura da curva, não são necessárias correções.
6. Havendo diferenças, ajusta-se a altura encontrada no material da peça para a mesma altura de curva e anota-se o numero de decibéis (PT) que devem ser acrescentados ou diminuídos do ganho primário.
7. O ganho resultante é denominado ganho corrigido ($GC = GP + \text{ou} - PT$).

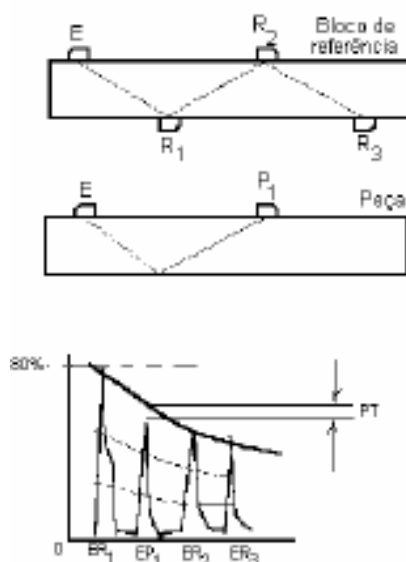


Figura 5: Ajuste da sensibilidade dos cabeçotes em função da perda por transferência.

Ganho para varredura deverá ser o ganho corrigido acrescido de, no mínimo, 6 dB. Para avaliação de descontinuidades, o ganho deverá ser o ganho corrigido, sem o acréscimo de 6 dB para ensaios realizados de acordo com o ASME Seção V.

11. Condição Superficial e Técnica de Preparação

A superfície deverá estar livre de respingos de solda, óxidos, carepa de laminação, tintas, sujeiras, rebarbas ou qualquer outra substância que possa afetar o resultado da inspeção e, que possa interferir no acoplamento satisfatório e na movimentação do cabeçote.

A superfície de ensaio deverá ser adequada para permitir a inspeção ultrassônica na sensibilidade indicada. Se for necessário, as superfícies deverão ser esmerilhadas, jateadas, escovadas, raspadas para realização do ensaio.

Na margem da solda deverá haver concordância suave entre as superfícies do metal de base e da solda. Quando for requerido o acoplamento sobre o cordão de solda, o reforço deverá ser totalmente removido.

Se a forma do reforço de solda é tal que mascare as reflexões das descontinuidades próximas à superfície ou que provoque sinais que impossibilitem a inspeção, deve-se usinar o reforço.

12. Acoplante

Poderá ser utilizados graxa, carboxe metil celulose diluída em água ou óleo da linha automotiva na situação que for mais aplicável.

13. Técnica de Varredura

A região do metal de base a ser percorrida pelas ondas do cabeçote angular, deverá ser previamente inspecionada com cabeçote normal e/ou duplo cristal para se pesquisar a existência de descontinuidades paralelas a superfícies que, caso existam, deverão ser registradas e levadas em consideração na avaliação do ensaio com cabeçotes angulares.

A área percorrida pelo cabeçote angular deverá ser suficiente para que seja ensaiada toda a solda e mais 20 mm do metal de base de cada lado da solda, ao longo da seção transversal, com incidência do feixe sônico o mais perpendicular possível com a zona de ligação (conforme figura 6). O ensaio sempre que possível, deverá ser feito por ambos os lados da solda, na mesma superfície. Deverá ser efetuado a marcação física dos limites da área a ser percorrida pelo cabeçote, por meio de tinta, lápis, riscador ou outro meio adequado.

Para detecção de descontinuidades transversais á solda, deve-se posicionar os cabeçotes o mais paralelo possível a solda, como mostrado na figura 7 (posições 1 e 2 ou 3 e 4). Quando o reforço do cordão de solda for removido, de modo a permitir o perfeito acoplamento dos cabeçotes, estes deverão ser posicionados sobre a solda e movimentados no sentido longitudinal como exemplificado na figura 7 (posições 5 e 6).

Todas as varreduras deverão ser executadas com uma sobreposição mínima de 15% do cristal.

A velocidade de ensaio não deverá ser maior do que 150 mm/s.

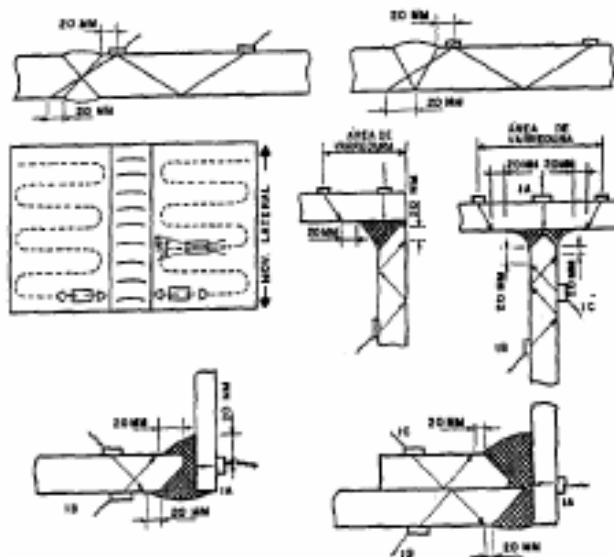


Figura 6: Exemplo de incidência do feixe sônico sobre o cordão de solda.

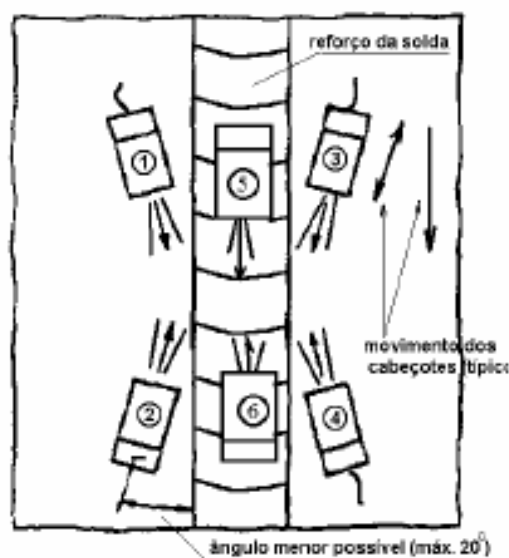


Figura 7: Modo correto de movimentação do cabeçote sobre o cordão de solda.

13.1 Varredura longitudinal da raiz da junta

Deve ser executada na detecção de descontinuidades longitudinais localizadas na raiz da solda e consiste em deslizar lentamente o cabeçote, ao longo do cordão de solda, podendo ser utilizado para esta finalidade em dispositivo para

posicionamento do cabeçote que mantenha fixa a distância do ponto de emissão do som ao centro da solda.

O cabeçote deve ser posicionado de maneira que a parte central do feixe sônico incida sobre a face da raiz mais próxima do cabeçote (conforme figura 8). Quando isto não for possível, devido as pequenas espessuras envolvidas e a largura do acabamento das soldas não permitir o perfeito acoplamento do cabeçote, este deve ser afastado e conseqüentemente provocar uma incidência na raiz da solda com parte do feixe sônico. Este fato deve ser considerado na avaliação das descontinuidades de raiz, pois haverá um aumento do caminho sônico e provavelmente uma diminuição na amplitude das reflexões.

Esta varredura deve ser executada por ambos os lados da solda com cabeçotes de 70 e 60 graus.

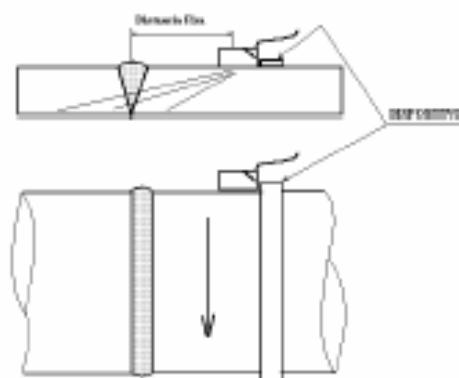


Figura 8: Incidência do feixe sônico sobre a face da raiz da solda

14. Requisitos Adicionais

1. Selecionar os cabeçotes, calibrar o aparelho e traça a curva de referência.
2. Ajustar a sensibilidade do aparelho.
3. Constatar a correta preparação da superfície.
4. Executar o exame conforme parâmetros descritos neste procedimento.
5. Mapear e relatar os resultados obtidos no exame, lançando-se no formulário de registro de resultados datados.

15. Critérios de Registro e Aceitação das Descontinuidades

O critério de registro e aceitação de descontinuidades deve estar de acordo com as normas de projeto e ser compatível com os métodos de calibração descritos neste procedimento.

15.1 Critério de Aceitação segundo a norma ASME VIII Divisão 1.

- a) Toda descontinuidade que produzir amplitude maior que 20% do nível de referência deve ser pesquisada em uma extensão que permita aos inspetor determiná-la, identificá-la e localizá-la e ser avaliada nos termos dos padrões de aceitação estabelecidos em nos itens b e c.
- b) São inaceitáveis, independente dos respectivos comprimentos ou amplitudes, as descontinuidades que forem interpretadas como sendo trincas, falta de fusão e falta de penetração.
- c) São inaceitáveis todas as descontinuidades que produzirem amplitude maior que o nível de referência e os respectivos comprimentos excederem a:
- 6 mm, para “T” até 19 mm;
 - $1/3$ “T” de 19 a 57 mm;
 - 19 mm, para “T” acima de 57 mm, onde “T” é a espessura da peça.
- d) Devem ser registradas em relatório todas as descontinuidades que produzirem amplitude maior que 50% do nível de referência, mesmo que as mesmas estejam aprovadas, conforme itens b e c.

16. Método de localização e dimensionamento de descontinuidades

16.1 Comprimento

O comprimento das descontinuidades deve ser determinado pela queda dos 6 dB nos extremos das descontinuidades.

16.2 Profundidade e Localização do chanfro

A profundidade e a localização do defeito são definidos aproximadamente de forma gráfica, partindo-se dos seguintes dados (ver figura 9).

- a) Percurso sônico lido na tela do aparelho, corresponde ao maior sinal emitido pelo defeito.
- b) ângulo do cabeçote
- c) Espessura da peça.

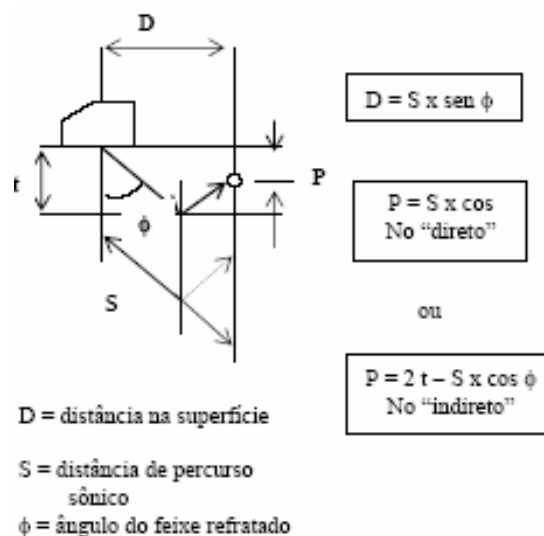


Figura 9: Definição matemática do percurso sônico, profundidade e distância

Pode ser feito um desenho em escala dos percursos sônicos, para cada cabeçote que for utilizado (45, 60 e 70°), bem como um desenho em escala da solda.

Para facilidade de operação, um deles deve ser executado em papel transparente.

ANEXO 1 – Métodos de calibração dos equipamentos e cabeçotes de ultra-som

I.1 Verificação da Linearidade Horizontal do Aparelho

Esta verificação pode ser efetuada utilizando-se um bloco de calibração padrão, como por exemplo o Bloco V1, e um cabeçote normal. A linearidade deve ser verificada numa faixa de escala ao menos igual á que será utilizada nos ensaios subseqüentes. Se os ensaios forem realizados com cabeçote angular (ondas transversais), a verificação deverá ser feita numa escala duas vezes maior ao percurso sônico total, levando-se em consideração a diferença de velocidades das ondas longitudinais e transversais.

Para verificação da linearidade horizontal do aparelho, devem ser seguidas as seguintes etapas:

- Coloque o cabeçote normal sobre o bloco padrão na posição em que o décimo eco de fundo corresponda a uma faixa maior ou igual aquela em que se quer verificar a linearidade. Ajuste os controles do equipamento de

maneira que o primeiro eco de fundo coincida com a 5ª divisão menor da escala (escala de 50 divisões) e o último com a 50ª divisão da escala.

- Posicione cada um dos ecos de fundo, um a um, a uma altura de 80% da tela. O lado esquerdo de cada eco deve corresponder a uma divisão da escala múltiplo de cinco.
- Registre qualquer desvio, expressando-o em termos de porcentagem da escala total.
- A tolerância na linearidade horizontal do equipamento ainda permitida é + ou - 2%.
- A verificação da linearidade horizontal deverá ser feita no mínimo uma vez por semana.

I.2 Verificação da linearidade do controle de ganho do aparelho

Esta é uma verificação combinada de duas características que afetam a linearidade do ganho do equipamento: a linearidade do amplificador e a precisão do controle calibrado. Qualquer bloco padrão de calibração pode ser utilizado, em conjunto com o cabeçote que será empregado no ensaio subsequente. A linearidade deve ser verificada com os controles do equipamento (frequência, pulso e energia, etc.) posicionada como estarão no ensaio subsequente.

A verificação da linearidade do controle de ganho do aparelho será realizada pelas seguintes etapas:

- Posicione o cabeçote no bloco de calibração de forma a obter uma indicação de um pequeno refletor, como por exemplo o furo de 1,5 mm do bloco V1.
- Ajuste o ganho para colocar esse sinal a 80% da altura da tela do aparelho e anote o valor do controle do ganho. Aumente o ganho em 2 dB. O sinal deveria subir a 100% da altura da tela.
- Coloque o ganho no valor original e depois reduza-o em 6 dB. O Sinal deverá cair a 40% da altura da tela.
- Reduza o ganho por mais 12 dB. O Sinal deverá cair a 10% da altura da tela.
- Reduza o ganho a mais 6 dB. O sinal deverá cair a 5% da altura da tela.

| Ganho (dB) | Altura esperada (% da tela) | Limites |
|-------------------|------------------------------------|-------------------|
| +2 | 100 | Não menos que 90% |
| 0 | 80 | ---- |
| -6 | 40 | 35% a 45% |
| -18 | 10 | 8% a 12% |
| -24 | 5 | Deve ser visível |

A verificação deve ser feita no mínimo uma vez por dia.

I.3 Verificação do ponto de saída do feixe sônico

Deverá ser efetuada através do posicionamento de um cabeçote angular, no lado apropriado do bloco V1.

- Movendo o cabeçote pra traz e pra frente, até maximizar o sinal, tomando-se cuidado de mover o cabeçote paralelo as laterais do bloco.
- Quando o sinal estiver no máximo, a marca do cabeçote irá corresponder a linha marcada no bloco que determina o centro geométrico do quadrante. Este ponto deve ser marcado no cabeçote.
- Se a posição verificada difere da marca existente por mais de 1,0 mm, a nova posição deverá ser marcada nas laterais do cabeçote.
- Recomenda-se que o desvio da saída do feixe sônico seja até no máximo de + ou – 1,0 mm, inclusive. Quando for maior que 1,0 mm, recomenda-se que a sapata seja lixada ou substituída.
- A frequência de verificações dependerá do índice de desgaste e da rugosidade da superfície a ser ensaiada. Quando o cabeçote está em uso contínuo, é recomendado que a verificação seja executada em pequenos intervalos de hora. No entanto ao menos uma verificação diária é necessário.

I.4 Verificação do ângulo real do cabeçote

Deverá ser verificado através do posicionamento de um cabeçote angular no lado apropriado do bloco V1.

- O bloco V1 contem as marcações dos graus referente ao refletor de 50 mm de diâmetro. As marcações de referência possibilitam o meio mais rápido para a verificação do ângulo, onde se pode fazer interpolação.

- Para receber o sinal refletido no furo transversal de 50 mm de diâmetro, mova o cabeçote para traz e para frente até maximizar o sinal do furo. Quando o mesmo estiver maximizado, verifica-se onde coincide o ponto de saída do feixe com a marcação existente no bloco.
- Os ângulos dos cabeçotes utilizados serão considerados aceitáveis, desde que se situem em + ou – 2 graus do valor nominal.
- A freqüência de verificação do ângulo real deve ser feita pelo menos uma vez ao dia.

I.5 Alinhamento do feixe sônico

Para verificar o desalinhamento do feixe sônico em cabeçotes angulares, é utilizado o bloco padrão V1, um transferidos com raio de pelo menos 75 mm e uma escala. A verificação do alinhamento deverá ser realizada da seguinte forma:

- O cabeçote é posicionado de forma que o eco da aresta do bloco seja maximizado, com movimentos de vai e vem e girando cabeçote.
- Com o eco maximizado, uma escala é colocada contra o cabeçote, e esta posição demarcada com uma linha de referência ao longo da escala.
- Posiciona-se o transferidor na borda do bloco de forma que faça um ângulo reto.
- O ângulo formado entre a linha de referência ao longo da escala e a linha de referência do transferidor, o desvio é angular.
- A tolerância do desvio do desalinhamento do feixe angular é 2 graus máximo.
- A periodicidade do teste deve ser feito pelo menos uma vez por mês.

I.6 Resolução

- Posicionar o cabeçote sobre o bloco de calibração da figura 10, de modo que o eixo do feixe incida em dois refletores simultaneamente. Os refletores devem ter uma separação em percurso sônico de aproximadamente 2 comprimentos de onda.
- Os sinais refletidos deve ser ajustados de forma que a amplitude entre eles sejam iguais, aproximadamente a metade da altura da tela.
- A resolução será considerada satisfatória, quando os sinais estiverem claramente separados na metade ou abaixo da altura dos mesmos (6 dB).

- A verificação da resolução deverá ser efetuada anualmente.

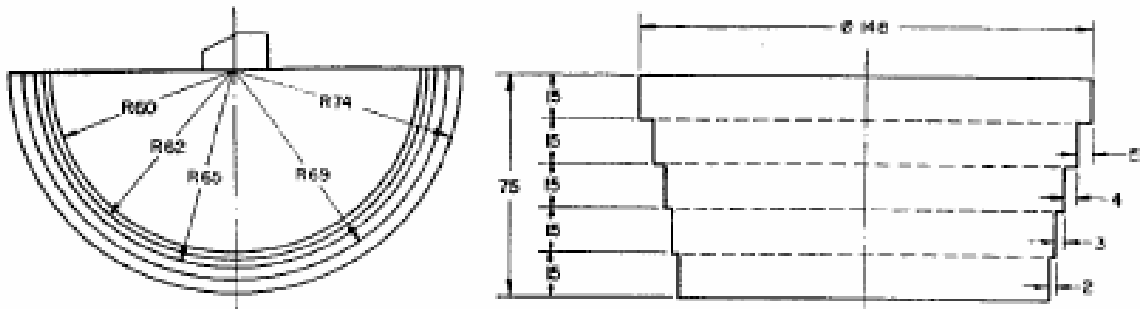


Figura 10: Bloco utilizado para verificação da resolução

**APENDICE 2 – ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM
UTILIZADO PARA FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA**

| 1 - JUNTA | | 2 - CROQUI | |
|------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| Tipo de Junta: | TOPO | | |
| Tipo de Chanfro: | “V” | | |
| Cobre-Junta: | NÃO APLICÁVEL | | |
| Material do Cobre Junta: | NÃO APLICÁVEL | | |
| Outros: | NÃO APLICÁVEL | | |
| 3 - METAIS DE BASE | | | |
| | MATERIAL (A) | Com | MATERIAL (B) |
| Especificação (Tipo e Grau): | ASTM A 240 TIPO 316 | Com | NÃO APLICÁVEL |
| P-Number: | 8 | Com | NÃO APLICÁVEL |
| Outros: | GRUPO 1 | | |
| | SOLDA EM CHANFRO | | SOLDA DE FILETE |
| Faixa de Espessuras: | 1,58 A 10,0 mm | | NÃO APLICÁVEL |
| Faixa de Diâmetros: | NÃO APLICÁVEL | | NÃO APLICÁVEL |
| Outros: | NÃO APLICÁVEL | | |
| 4 – METAIS DE ADIÇÃO | | | |
| | CONSUMÍVEL (A) | | CONSUMÍVEL (B) |
| Especificação (SFA): | 5.22 | | NÃO APLICÁVEL |
| Classificação (AWS): | E316L | | NÃO APLICÁVEL |
| F-Number: | 6 | | NÃO APLICÁVEL |
| A-number: | - | | NÃO APLICÁVEL |
| Diâmetro: | 1,6 mm | | NÃO APLICÁVEL |
| Outros: | MARCA COMERCIAL: Lincoln | | NÃO APLICÁVEL |
| 5 – POSIÇÕES | | 6 - CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS | |
| Solda em Chanfro: | 1G | Corrente / Polaridade: | CC- |
| Progressão: | NÃO APLICÁVEL | Faixa de corrente: | 150 a 160 A |
| Solda de Filete: | NÃO APLICÁVEL | Faixa de tensão: | 24 a 25 V |
| 7 – GÁS | | | |
| | GÁS | COMPOSIÇÃO | VAZÃO |
| Gás de Proteção: | C-25 | Ar(75%)+Co₂(25%) | 10 l/min |
| Gás de Purga: | NÃO APLICÁVEL | NÃO APLICÁVEL | NÃO APLICÁVEL |
| Outros: | NÃO APLICÁVEL | | |

| 8 - PRÉ-AQUECIMENTO | | | | 9 - TRATAMENTO TÉRMICO APÓS SOLDAGEM | | | | |
|---|----------------------|-----------------|---------------|--------------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------|----------------------------------|
| Temperatura Mínima: | NÃO APLICÁVEL | | | Taxa de Aquecimento: | NÃO APLICÁVEL | | | |
| Temperatura Interpasses: | NÃO APLICÁVEL | | | Temperatura: | NÃO APLICÁVEL | | | |
| Outros: | NÃO APLICÁVEL | | | Tempo de permanência: | NÃO APLICÁVEL | | | |
| | | | | Taxa de resfriamento: | NÃO APLICÁVEL | | | |
| | | | | Outros: | NÃO APLICÁVEL | | | |
| 10 – TÉCNICA | | | | | | | | |
| Limpeza Inicial: | ESCOVADA | | | Entre Passes: | ESCOVADA | | | |
| Cordão: | RETILÍNEO | | | Goivagem: | NÃO APLICÁVEL | | | |
| Faixa de Velocidade de Avanço: | NÃO APLICÁVEL | | | | | | | |
| Dim. do Orifício ou Bocal de Alim. do Gás: | NÃO APLICÁVEL | | | | | | | |
| Distância entre o Tubo de Contato e a Peça: | NÃO APLICÁVEL | | | | | | | |
| Velocidade de Alimentação do Arame: | NÃO APLICÁVEL | | | | | | | |
| Método de Transferência (processo GMAW): | NÃO APLICÁVEL | | | | | | | |
| Outros: | NÃO APLICÁVEL | | | | | | | |
| Passe | Camada | Metal de Adição | | Corrente | | Faixa de Tensão (V) | Veloc. (cm/min) | Pr o c e s s o |
| | | Classif. | Diâmetro (mm) | Tipo | Faixa (A) | | | |
| 1 | 1,2 e 3 | E316L-T4 | 1,6 mm | CC- | 140 A 150 | 24 A 25 | -- | F C A W |

**APENDICE 3 – IMAGENS RADIOGRÁFICAS OBTIDAS NOS ENSAIOS DE
GAMAGRAFIA REALIZADOS NOS CORPOS DE PROVA ANALISADO**

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)