

Carlos Leandro de Toledo

**ESTUDO DA APLICABILIDADE DO ENSAIO POR
ULTRASSOM CONVENCIONAL PARA AVALIAR A
QUALIDADE DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS
INOXIDÁVEIS DUPLEX UNS S32205**

Monografia apresentada ao Programa de Educação
Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para conclusão do curso
de Especialização em Engenharia de Soldagem.

São Paulo
Fevereiro de 2014

Carlos Leandro de Toledo

(Engenheiro Mecânico, Universidade Metodista de Piracicaba, 2011)

**ESTUDO DA APLICABILIDADE DO ENSAIO POR
ULTRASSOM CONVENCIONAL PARA AVALIAR A
QUALIDADE DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS
INOXIDÁVEIS DUPLEX UNS S32205**

Monografia apresentada ao Programa de Educação
Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para conclusão do curso
de Especialização em Engenharia de Soldagem.

Área de Concentração:
Engenharia da Soldagem

Orientador:
Prof. Dr. José Pinto Ramalho

São Paulo
Março de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Toledo, Carlos Leandro

Estudo da aplicabilidade do ensaio por ultrassom convencional para avaliar a qualidade de juntas soldadas de aços inoxidáveis duplex UNS S32205 / C. L. Toledo. – São Paulo, 2013. 136 p.

Monografia (Especialização em Engenharia de Soldagem) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

**1. Ultrassom Convencional. 2. Inspeção em Duplex
3. Soldagem TIG. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Programa de Educação Continuada em Engenharia II. t.**

A força não provém de uma capacidade física. Provém de uma vontade indomável.

Mahatma Gandhi

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Mariana que desde o início de nossa união sempre me deu forças para superar os obstáculos e me encorajar para novos desafios.

A minha família pelos ensinamentos da responsabilidade desde muito jovem.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre me iluminando, me direcionando aos caminhos que a vida sempre me propôs, regando incondicionalmente minha crença no ser maior, e que por mais difíceis e árduos os obstáculos, jamais me abandonou.

Agradeço à minha esposa Mariana pela paciência, dedicação, companheirismo de sempre e no entendimento de minhas ausências, me proporcionando apoio em cada passo e decisão de minha vida.

Aos meus amigos, pela compreensão das ausências nos momentos que quiseram estar comigo ou precisaram de mim, e eu não pude contribuir com minha presença.

Aos meus pais, Pedro Carlos e Marli pela educação e ensinamentos que me foram direcionados quando juntos estavam.

Aos meus irmãos, Michele, Fernando e Branco pelo companheirismo de sempre.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Ramalho, agradeço a paciência, as explicações, as orientações, os direcionamentos e a amizade adquiridas ao longo desta atividade e durante todo o período acadêmico.

Ao Prof. Dr. Sérgio Brandi, e ao corpo docente do curso de Engenharia de Soldagem, pelos novos ensinamentos de uma área que muito me encanta.

Aos amigos de sala, que sempre me incentivaram com tamanho companheirismo em todos os momentos e que estiveram ao meu lado durante todo o período de Pós-Graduação.

Agradeço aos Amigos Renato Aguiar da empresa Esab e ao Bruno Melloto pela disponibilidade dos consumíveis necessários para execução da soldagem dos experimentos.

Agradeço ao Sr. Antonio Zannette da empresa Engemasa pela disponibilidade da matéria prima fundamental na realização deste trabalho.

Um agradecimento à equipe da Poliend, Marcelo, Lucília, Fábio, e todos os funcionários, colegas e amigos, em especial a Cristiana Salomão que me ajudou muito com sua habilidade de organização e conteúdo nas referências bibliográficas.

Agradeço à equipe e Diretores da ADTech, pelo apoio na produção dos corpos de prova e pela confiança no desenvolvimento da pesquisa que deu complemento a este trabalho.

Um agradecimento especial ao soldador Hamilker Bernardi da Silva que se envolveu intensamente no êxito da elaboração dos corpos de prova.

E, por fim, agradeço a todas as pessoas que, de uma forma direta ou indireta, através da troca de informações e discussões, contribuíram para o enriquecimento deste trabalho.

CURRICULUM VITAE

Formação:

2º Grau – Escola Estadual Dr. Jorge Coury – (conclusão 1999)

Técnico em Mecânica – Colégio Industrial Coronel Febeliano da Costa – (conclusão 2002)

Engenharia Mecânica – Universidade Metodista de Piracicaba, Unimep – (2006/2011 conclusão).

Experiência profissional:

Sólida experiência na área de Ensaios Não Destrutivos e Soldagem, atuação intensa no desenvolvimento de atividades em campo e supervisão de equipe, bem como gerenciamento dos mesmos.

Atualmente como Diretor de Desenvolvimento Técnico – Poliend Inspeções e Soldagem

Qualificações:

Ultrassom Nível 2 - SNQC;

Líquido Penetrante Nível 2 SNQC;

Partículas Magnéticas Nível 2 SNQC;

Ensaio Visual e Dimensional de solda Nível 2 SNQC;

Ultrassom Nível 2 KTA 3903 (Nuclear).

Ultrasonic Phased Array – Forgings & Welds – Level 2 PCN

TOFD – Welds – Level 2 PCN

Cursos:

Curso de Ultrassom nível 2 – 120 horas – CTQ;

Curso Líquido Penetrante nível 2 – 64 horas – CTQ;

Curso Partículas Magnéticas nível 2 – 80 horas – CTQ;

Curso de Ultra-som - Phased Array - 40 horas - PróEnd Consultoria;

Curso de Ultra-som - Phased Array - 80 horas - CINDE - Canadian Institute For NDE;

Curso de Ultra-som Técnica do Time of Flight Diffraction / TOFD - 08 horas - Abendi;

Curso de Líquido Penetrante nível 3 - 40 horas - Abendi;

Curso Phased Array nível 2 PCN – 80 horas - Lavender International Texas-Houston;

Curso TOFD nível 2 PCN – 80 horas – Lavender International Texas-Houston;

Curso Tomoview Analisis Computer Software – 40 horas – Lavender International Texas-Houston;

Inspetor de Soldagem Nível 1 – 220 horas - FBTS

Tecnologia da Soldagem – 40 horas – Senai

RESUMO

A utilização de equipamentos fabricados com uso de materiais inoxidáveis está em crescente demanda nos dias atuais, principalmente pela busca de características resistentes aos mais variados ambientes de agressividade estrutural, sendo fundamental estabelecer um controle de qualidade da soldagem executada nestes componentes. Dentre as opções para controle da qualidade apresentam-se o ensaio radiográfico e o ensaio por ultrassom convencional como métodos não-destrutivos capazes de avaliar a integridade das condições volumétricas de juntas soldadas e metais de base.

O presente trabalho compara estes dois ensaios visando identificar o efetivo domínio pela busca da aplicabilidade do ensaio por ultrassom convencional em juntas soldadas de material duplex UNS S32205. O estudo teve como base a realização da soldagem, avaliação e posterior comparação dos laudos de ultrassom convencional com o ensaio radiográfico em quatro corpos de provas com tipos de descontinuidades distintas (falta de fusão, falta de penetração, trinca e porosidade) realizadas com o processo de soldagem GTAW.

A experiência neste trabalho mostra uma equivalência entre os ensaios realizados para a detecção de descontinuidades internas, e a melhor eficácia do ensaio por ultrassom convencional com uso de transdutores angulares de onda longitudinal em material duplex após soldagem. Além disso, foi observada, uma maior sensibilidade do ensaio por ultrassom convencional na detecção de descontinuidades lineares caracterizadas como trinca, permitindo mensurar com

maior eficiência sua localização em profundidade.

Palavras Chave: Ensaio por Ultrassom Convencional. Ensaio Radiográfico
Inspeção em Aço Inoxidável Duplex. Soldagem TIG.

ABSTRACT

Toledo, C. L. Study of the applicability of the conventional ultrasonic testing welded joints of duplex stainless steel UNS S32205. São Paulo, 2014, 119p. Paper presented as a requirement for obtaining specialization certificate of Welding Engineering to Programa de Educação Continuada em Engenharia of Escola Politécnica, at Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

The use of equipment manufactured with the use of stainless materials are in growing demand today, mostly by searching characteristics resistant to various structural environments aggression, being essential to establish quality control of welding performed on these components. Among the options for quality control are presented radiographic testing and ultrasonic testing as conventional nondestructive methods capable of evaluating the integrity volumetric conditions of welded joints and base metals. This paper compares the two tests for effective search of applicability of the assay by conventional ultrasonic welded joints of austenitic-ferritic material characteristic duplex UNS S32205 . The study was based on the evaluation and comparison of reports of conventional ultrasonic and radiographic testing provided in 04 test samples with different types of discontinuities (lack of fusion, lack of penetration, porosity and crack) from the GTAW welding process.

The experiment in this study show equivalence between the tests for the detection of internal discontinuities, as well as demonstrating the efficiency of conventional ultrasonic testing of materials austenitic-ferritic characteristic after

welding with the use of angular transducers of a longitudinal wave. It also demonstrates a greater sensitivity of the assay by conventional ultrasonic detection of discontinuities characterized as linear crack, providing effectively measure their location in depth.

Keywords : Conventional Ultrasonic Testing. Radiographic Testing Inspection Duplex . GTAW Welding

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Inspeção de um vaso de pressão em aço inoxidável.....	2
Figura 2.1 – Processo de fundição.....	6
Figura 2.2 – Rechupe.....	8
Figura 2.3 – Porosidade.....	8
Figura 2.4 – Trinca Ramificada.....	9
Figura 2.5 – Diagrama de Shaeffler.....	10
Figura 2.6 – Microestrutura típica do metal base AISI 316L.....	11
Figura 2.7 – Microestrutura típica de material ferrítico.....	12
Figura 2.8 – Microestrutura típica de material martensítico.....	13
Figura 2.9 – Microestrutura típica do aço duplex UNS S32205.....	15
Figura 2.10 – Processo de soldagem TIG.....	23
Figura 2.11 – Falta de fusão.....	25
Figura 2.12 – Falta de penetração.....	26
Figura 2.13 – Imagem de Trinca.....	27
Figura 2.14 – Poro/Porosidade.....	28
Figura 2.15 – Inspeção por líquido penetrante.....	32
Figura 2.16 – Indução de fluxo magnético.....	34
Figura 2.17 – Inspeção por partículas magnéticas por indução de fluxo.....	35
Figura 2.18 – Filmes de ensaio radiográfico de tubulações.....	36
Figura 2.19 – Variações da imagem de acordo com o distanciamento da fonte.....	42
Figura 2.20 – Técnica de exposição Parede Simples – Vista Simples.....	43
Figura 2.21 – Técnica de exposição Parede Dupla – Vista Simples.....	44
Figura 2.22 – Técnica de exposição Parede Dupla – Vista Dupla.....	45
Figura 2.23 – Visualização de mordedura na margem da solda.....	46
Figura 2.24 – Montagem de chassi no equipamento.....	46
Figura 2.25 – Execução do laudo no negatoscópio.....	48
Figura 2.26 – Definições de ondas.....	51
Figura 2.27 – Ondas geradas a partir de uma onda longitudinal incidente.....	52
Figura 2.28 – Feixe sônico.....	54
Figura 2.29 – Cabeçote normal (A) e angular (B).....	55
Figura 2.30 – Método pulso-eco.....	56
Figura 2.31 – Visualizações A-Scan e B-Scan.....	58
Figura 2.32 – Execução do ensaio por ultrassom convencional.....	60
Figura 4.1 – Lingote fundido e usinado.....	63
Figura 4.2 – Extração do disco para preparação da junta.....	64
Figura 4.3 – Preparação da junta para soldagem.....	64
Figura 4.4 – Identificação dos corpos de prova.....	65
Figura 4.5 – Transdutores ultrassônicos.....	66
Figura 4.6 – Ensaio em lingote usinado.....	68
Figura 4.7 – Ensaio em lingote usinado – Partículas magnéticas fluorescente.....	69
Figura 4.8 – Inspeção por ultrassom.....	69
Figura 4.9 – Inspeção por ultrassom.....	70
Figura 4.10 – Inspeção por ultrassom.....	70
Figura 4.11 – Inspeção por ultrassom.....	70
Figura 4.12 – Extração do bloco quadrado.....	71
Figura 4.13 – Acoplamento do transdutor MSEB4H nas direções X, Y e Z.....	72
Figura 4.14 – Imagens micrográficas do duplex UNS S32205 na face X do bloco.....	72

Figura 4.15 – Imagens micrográficas do duplex UNS S32205 na face Y do bloco. ...	73
Figura 4.16 – Imagens micrográficas do duplex UNS S32205 na face Z do bloco....	73
Figura 4.17 – Extração dos discos no corpo do lingote e usinagem dos chanfros	74
Figura 4.18 – Preparação das juntas e execução da soldagem.....	74
Figura 4.19 – Corpos de prova com reforços de solda removidos	75
Figura 4.20 – Ensaios nos corpos de prova soldados	76
Figura 4.21 – Bloco de calibração para inspeção com transdutor angular.....	76
Figura 5.1 – Resultado do ensaio por líquido penetrante no lingote usinado.....	78
Figura 5.2 – Resultado do ensaio por partículas magnéticas no lingote usinado.....	79
Figura 5.3 – Acoplamento do transdutor B2SN no sentido radial do lingote	79
Figura 5.4 – Acoplamento do transdutor B2SN no sentido axial do lingote.....	80
Figura 5.5 – Acoplamento do transdutor MB4S no sentido radial do lingote.....	81
Figura 5.6 – Acoplamento do transdutor B2SN no sentido axial do lingote.....	81
Figura 5.7 – Ecodinâmica da atenuação sônica no bloco quadrado de 30mm	82
Figura 5.8 – Ecodinâmica da falta de fusão no corpo de prova CP-USP-01	84
Figura 5.9 – Radiografias da junta CP-USP-01.....	84
Figura 5.10 – Macrografia do CP-USP-01.....	84
Figura 5.11 – Macrografia localizada do CP-USP-01.....	85
Figura 5.12 – Ecodinâmica da falta de penetração no corpo de prova CP-USP-02..	85
Figura 5.13 – Radiografias da junta CP-USP-02.....	86
Figura 5.14 – Macrografia do CP-USP-01.....	87
Figura 5.15 – Macrografia localizada do CP-USP-02.....	87
Figura 5.16 – Ecodinâmica da falta de penetração no corpo de prova CP-USP-02..	88
Figura 5.17 – Radiografias da junta CP-USP-03.....	88
Figura 5.18 – Macrografia do CP-USP-03.....	89
Figura 5.19 – Macrografia localizada do CP-USP-03.....	90
Figura 5.20 – Radiografias da junta CP-USP-05.....	90
Figura 5.21 – Inserção de trinca longitudinal no cordão de solda do CP-USP-05.....	91
Figura 5.22 – Ecodinâmica da trinca no corpo de prova CP-USP-05.....	91
Figura 5.23 – Macrografia do CP-USP-05.....	92
Figura 5.24 – Macrografia localizada do CP-USP-05.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química nominal de um aço inoxidável

Tabela 4.1 – Composição química do lingote

Tabela 4.2 – Identificação dos corpos de prova

Tabela 4.3 – Característica dos transdutores

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios nos corpos de prova

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

END – Ensaio Não Destrutivo

EVS – Ensaio Visual de Solda

LP – Líquido Penetrante

RX – Ensaio Radiográfico

US – Ultrassom Convencional

ABENDI – Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivo e Inspeção

SNQC – Sistema Nacional de Qualificação e Certificação de Pessoas

TIG – Tungsten Inert Gas

ASME – American Society of Mechanical Engineers

FP – Falta de Penetração

FF – Falta de Fusão

PO – Porosidade

TR – Trinca

DAC – Curva de Distancia e Amplitude

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Aço Fundido	3
2.2	Tipos de Descontinuidades em Aço Fundido	7
2.3	Aços Inoxidáveis.....	9
2.3.1	Aços Inoxidáveis Austeníticos.....	10
2.3.2	Aços Inoxidáveis Ferríticos	11
2.3.3	Aços Inoxidáveis Martensíticos	12
2.3.4	Aços Inoxidáveis Endurecidos por Precipitação.....	13
2.4	Aços Inoxidáveis Duplex	13
2.4.1	Histórico	14
2.4.2	Características do Aço Inoxidável Duplex.....	15
2.4.3	Transformações de Fase	16
2.4.4	Aço inoxidável duplex fundido.....	16
2.4.5	Características do Aço Inoxidável Duplex UNS S32205.....	18
2.4.6	Metalurgia da Soldagem	19
2.5	Processo de soldagem.....	21
2.5.1	Processo de soldagem TIG.....	21
2.6	Métodos de ensaios e controle de qualidade	28
2.6.1	Ensaio Destrutivos.....	29
2.6.2	Ensaio Não Destrutivos	30
3	OBJETIVO	61
4	MATERIAIS E MÉTODOS	62
4.1	Materiais.....	63
4.2	Métodos.....	66
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
6	CONCLUSÕES	94
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	96
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
	ANEXO A – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS REALIZADOS	100
	ANEXO B – PROCEDIMENTO DO ENSAIO	118

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

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 comprovadas de análise por ultrassom convencional em peças de aço inoxidável duplex e, por esta ser uma aplicação relativamente recente, ainda são poucas as literaturas que tratam do tema.

O presente trabalho visa estudar a viabilidade da execução do ensaio de ultrassom convencional na inspeção de juntas soldadas de topo no aço fundido duplex UNS S32205. Todo o estudo foi baseado na criação de um procedimento de trabalho conforme requisitos estabelecidos no código ASME/2011 (American Society of Mechanical Engineers). O procedimento de ultrassom foi elaborado de acordo ao código ASME V e as avaliações das juntas soldadas foram realizadas conforme requisitos contidos no código ASME VIII Divisão 1.

Os resultados obtidos no ensaio por ultrassom foram comparados com os resultados obtidos no ensaio de gamagrafia industrial, evidenciando tanto a eficácia no método criado como também resultados que atendem aos objetivos e requisitos normativos. Desta forma, este trabalho fornece uma alternativa para a complementação aos atuais métodos de controle de qualidade e agrega confiabilidade a novos projetos ao desmistificar o paradigma de se empregar a técnica de ultrassom em materiais de característica austeno-ferrítico.



Figura 1.1 – Inspeção de um vaso de pressão em aço inoxidável.
Construído na empresa Dedini/Piracicaba (Fonte: Poliend)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica utilizada para a realização do trabalho, que aborda as principais aplicações para o uso de materiais fundidos, as principais descontinuidades encontradas no seu processo de fabricação e soldagem e os principais métodos não destrutivos de inspeção empregados na comprovação do êxito da eficácia do ensaio por ultrassom convencional no referido material.

2.1 Aço Fundido

Aço fundido é aquele que geralmente é vazado em moldes de areia ou metálicos, onde adquire a forma exata da cavidade do molde (método deste trabalho). Quando se trata de peças fundidas os moldes conferem às mesmas suas formas praticamente definitivas necessitando eventualmente pequenos ajustes dimensionais através de operações de usinagem para acabamento. Entretanto, quando o aço é vazado em lingoteiras, produzindo “lingotes”, é então submetido posteriormente a solidificação e a processos diversos de conformação mecânica. Os aços podem ser classificados em vários tipos de acordo com a prática empregada em sua desoxidação ou alternativamente pela quantidade de gás desprendido durante a solidificação. (BLAIR, M. [1])

No caso das peças de aço fundidas o grande emprego da técnica de fundição deve-se ao fato desta produzir peças de grandes variedades de formas e dimensões, com razoável resistência mecânica e tenacidade e a um custo relativamente baixo. Sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, admite-se geralmente que o aço fundido seja de qualidade inferior ao trabalhado (laminado).

Além disso, é frequente que as peças apresentem descontinuidades superficiais ou internas, típicas dos processos de fundição. (CHIAVERINI, V. [2])

Deve-se procurar que as paredes das peças fundidas apresentem a espessura mais uniforme possível, compatível com as exigências da fundição, pois a mudança brusca de espessura pode causar defeitos e fissuras superficiais. Um aumento localizado de espessura da parede, com o objetivo de garantir uma melhor resistência mecânica, pode comprometer a homogeneidade da peça.

A resistência e a homogeneidade de uma peça fundida dependem mais da uniformidade da espessura do que do reforço localizado em certas partes, de maneira que é preferível, às vezes, modificar a sua forma a aumentar certas espessuras de paredes.

Na impossibilidade de ter-se uma espessura uniforme nas paredes, como no caso de peças de formas complicadas, deve-se procurar reduzir ao mínimo a quantidade de espessuras diferentes. Por outro lado, reduzindo ao mínimo a possibilidade de espessuras diferentes, é necessário que a transição de uma espessura para outra seja progressiva e uniforme. Tais transições devem ser na direção de uma área que possa ser alimentada com metal líquido e devem evitar mudanças bruscas de secções que apresentem grande probabilidade de gerar defeitos de fundição.

As espessuras de membros e nervuras nas quais constituem o contorno externo da peça fundida dependem da resistência exigida. Os membros principais ligam várias paredes e têm por finalidade aumentar a rigidez das peças. As nervuras servem para reforçar certas partes, tais como as juntas entre as paredes e os membros.

Como os membros não estão comumente em contato direto com os canais de alimentação e não são, portanto, tão bem alimentados com metal fundido, é necessário reduzir sua espessura, adotando-se geralmente um valor correspondente a $4/5$ ou às vezes menos da espessura das paredes que são ligadas com os canais. As nervuras geralmente tem uma espessura da ordem de $2/3$ da espessura da parede. (BLAIR, M. [1])

Os defeitos originados pela contração ocorrem em locais onde há excesso da massa de metal, denominados “pontos superaquecidos”, os quais, devido à massa adicional que apresentam, são as últimas secções a solidificar.

A localização desses pontos ocorre na intersecção, nas junções de partes da peça de espessura uniforme ou nas junções de partes de secções abruptamente diferentes, na transição abrupta de espessuras diferentes de uma mesma parte, em concentrações isoladas de massas de metal tais como saliências e ressaltos, em massas relativamente pesadas situadas sobre uma estrutura geralmente mais leve, em posições difíceis de serem atingidas pelo metal líquido ou em cavidades profundas.

Para prevenir esse defeito, o principio fundamental reside na equalização das secções e no projeto do molde de maneira a produzir uma sequencia apropriada de solidificação, levando em conta as junções de duas paredes (ou intersecções em ângulo reto), as junções de três paredes (peças em forma de tê), as junções de quatro, cinco ou mais paredes, o reforço de nervuras e vãos, as dimensões dos orifícios e outras particularidades das peças, cuja discussão escapa a finalidade da presente obra. (BLAIR, M. [1])

O conhecimento das técnicas de vazamento e moldagem permite geralmente que o projeto das peças assegure a obtenção de material sadio e econômico.

Um estudo conveniente do projeto ou sua modificação permitirá aperfeiçoar e facilitar a moldagem, tornando assim o projeto mais econômico e propiciando localizar de maneira mais conveniente os canais de vazamento e alimentação, para garantir maior homogeneidade do material.

A localização bem estudada dos canais assegurará a alimentação e suprimento adequados de metal líquido, evitando assim algumas falhas de fundição muito comuns quando aquela localização for imprópria tais como: inclusões de areia, deslocamento dos machos, vazios de contração, etc.

O projetista não pode ignorar esses fatos, assim como deve levar em conta as secções que serão usinadas, as secções mais maciças das peças, a possibilidade de dar vazão aos gases provenientes dos machos, as tolerâncias exigidas nas peças fundidas e outros fatores que irão influir decisivamente na localização de todos os tipos de canais para prevenir os defeitos e facilitar as condições de moldagem.



Figura 2.1 – Processo de fundição
(Fonte: Poliend)

2.2 Tipos de Descontinuidades em Fundição

Várias descontinuidades podem ocorrer no processo de produção de materiais fundidos, de acordo com diversos fatores. Entre estes, podemos citar: a complexidade de geometria do produto, características dos materiais, desenho das peças e técnicas de processamento. Enquanto algumas descontinuidades afetam somente a aparência física das peças e de componentes, outras podem afetar de maneira significativa a integridade estrutural das mesmas em condição final, tais como:

- Inclusão da areia do molde - nas paredes internas ou externas da peça, o que pode ocasionar problemas de usinagem uma vez que os grãos de areia são abrasivos e, por esta razão podem danificar as ferramentas empregadas na usinagem posterior a operação de fundição e também podem vir a ser causadores de defeitos na superfície da peça usinada;
- Defeitos de composição da liga metálica - que podem causar o aparecimento de partículas duras indesejáveis no material, o que também pode vir a ser o causador de desgaste da ferramenta de usinagem;
- Rechupe - ou seja, falta de material devido ao processo de solidificação, causado por projeto de massalote mal feito;



Figura 2.2 – Rechupe
(Fonte: Poliend)

- Porosidade - que pode se originar dos gases que existem dentro do metal líquido e não são eliminados durante o processo de vazamento e solidificação, podendo causar fragilidade e descontinuidades superficiais na peça usinada.

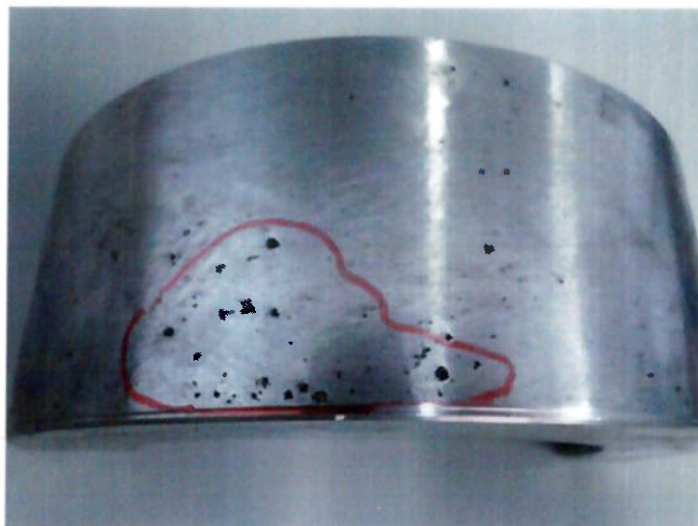


Figura 2.3 – Porosidade
(Fonte: Poliend)

- Trinca



Figura 2.4 – Trinca Ramificada
(Fonte: Poliend)

2.3 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são baseados no sistema ferro-cromo, ferro-cromo-carbono e ferro-cromo-níquel, podendo também conter adições de outros elementos de liga tais como: molibdênio, manganês, silício, cobre, titânio, nióbio, vanádio e nitrogênio, que são empregados para alterar suas microestruturas e propriedades. São classificados de acordo com sua microestrutura (TOTTEN, G.E. [3]). São eles: aços austeníticos, aços ferríticos, aços martensíticos, aços duplex e aços endurecidos por precipitação. Os tipos mais comuns de aços inoxidáveis como austeníticos, ferríticos e martensíticos foram descobertos na primeira década do século 20. Com a descoberta dos inoxidáveis, a indústria química e as aplicações em altas temperaturas tiveram uma nova classe de materiais disponíveis, mais adequada às suas instalações. Os números de produção mostram claramente o impacto causado por esses materiais. Em 1934, aproximadamente 56.000 toneladas

de aço eram produzidas, enquanto que em 1953, mais de 1 milhão de toneladas representavam a produção. (TOTTEN, G.E. [3])

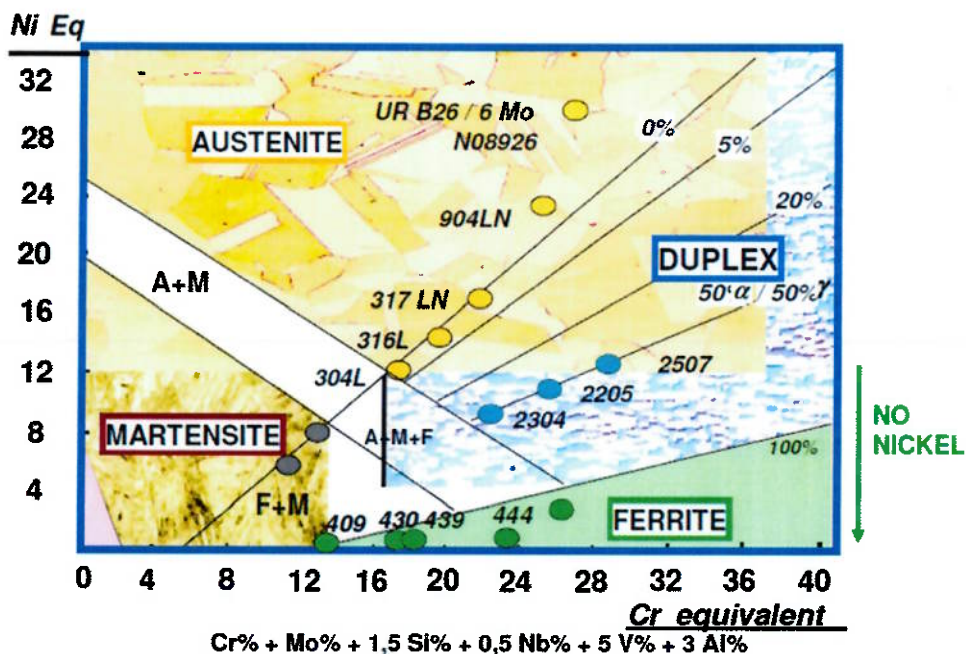


Figura 2.5 – Diagrama de Shaeffler
 Representação esquemática dos aços inoxidáveis no diagrama
 (Fonte: J. Charles [37])

2.3.1 Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos tem estrutura cúbica de face centrada. Tal estrutura é obtida através de elementos estabilizadores da austenita como níquel, manganês e nitrogênio. São chamados de austeníticos por apresentar esta fase estável em temperaturas até mesmo inferiores a ambiente (PUPINM, L.A.L.Z. [5]). Esses aços são essencialmente não-magnéticos. O teor de cromo geralmente varia de 16% a 26%, o teor de níquel até 35% e o de manganês em até 15%. Molibdênio, cobre, silício, alumínio, titânio e nióbio podem ser adicionados para certas características como resistência a corrosão por pites ou resistência a oxidação,

enquanto que enxofre ou selênio podem ser adicionados para melhorar a usinabilidade da liga. (ASM HANDBOOK. [6]).



Figura 2.6 – Microestrutura típica do metal base AISI 316L
Fonte: Laboratório Unimep

2.3.2 Aços Inoxidáveis Ferríticos

Estes aços contêm essencialmente elementos de liga estabilizadores de ferrita como o cromo, o molibdênio, o silício, o nióbio. Eles possuem estrutura cúbica de corpo centrado. O teor de cromo é na faixa de 10,5% a 30% e podem conter também molibdênio, silício, alumínio, titânio e nióbio para lhe conferir características particulares. Enxofre ou selênio podem ser adicionados no aço ferrítico para melhorar sua usinabilidade.

Ligas ferríticas são ferromagnéticas. Podem apresentar boa ductilidade e formabilidade, porém a tenacidade pode ser limitada em condições de baixas temperaturas devido a estrutura cristalina CCC. A fragilização dos aços inoxidáveis ferríticos pode ter diversas causas, embora o carbono e o nitrogênio desempenham um papel muito importante na maioria dos casos. (ASM HANDBOOK [5]). Esses

aços possuem normalmente baixo custo e são imunes à corrosão sob tensão (MAGALHÃES, M., MAGNABOSCO, R. [7]).

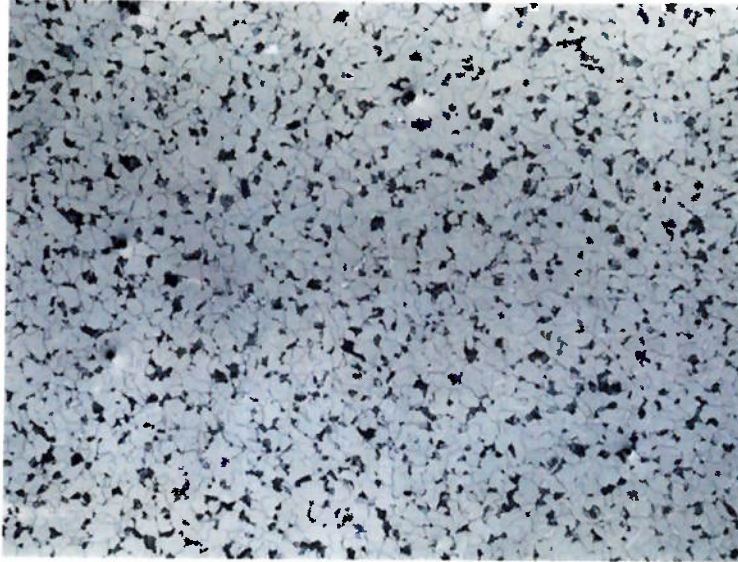


Figura 2.7 – Microestrutura típica de material ferrítico
Fonte: Laboratório Unimep

2.3.3 Aços Inoxidáveis Martensíticos

São caracterizados essencialmente por ligas de cromo e carbono que possuem estrutura tetragonal de face centrada. São ferromagnéticos, endurecíveis por tratamentos térmicos e geralmente são resistentes à corrosão. O teor de cromo é geralmente na faixa de 10,5% a 18% e o teor de carbono pode exceder 1,2%. As quantidades são balanceadas para garantir uma estrutura martensítica após o endurecimento. O excesso de carbonetos pode estar presente para aumentar a resistência ao desgaste ou para manter arestas cortantes, como no caso das lâminas de faca. Elementos como nióbio, silício, tungstênio e vanádio podem ser adicionados para modificar a resposta da têmpera após o endurecimento. Pequenas quantidades de níquel podem ser adicionadas para melhorar a resistência a corrosão e a tenacidade. Enxofre ou selênio podem ser adicionados para melhorar a usinabilidade (ASM HANDBOOK. [6]).

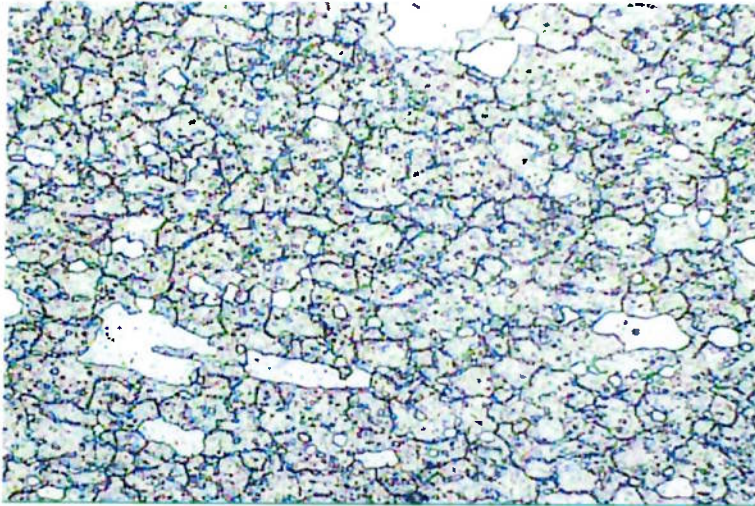


Figura 2.8 – Microestrutura típica de material martensítico
Fonte: Laboratório Unimep

2.3.4 Aços Inoxidáveis Endurecidos por Precipitação

São ligas à base de cromo-níquel que contém elementos que causam o endurecimento por precipitação, como cobre, alumínio ou titânio. Tais aços podem ser austeníticos, semi-austeníticos ou martensíticos na condição recozida. Os aços austeníticos podem ser frequentemente transformados em martensíticos através de tratamento térmico. (ASM HANDBOOK. [6])

2.4 Aços Inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis duplex pertencem a uma classe de materiais que apresentam resistência mecânica superior, além de elevada resistência a corrosão-sob-tensão em meios contendo cloretos ou H_2S , quando comparados aos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos convencionais. Estas características tornam os aços duplex e superduplex potenciais substitutos dos aços inoxidáveis em aplicações nas áreas química, petroquímica, de prospecção de petróleo em águas marinhas, papel e celulose e cutelaria, entre outras.

2.4.1 Histórico dos Aços Inoxidáveis Duplex

A primeira referência sobre o aço inoxidável duplex surgiu em 1927, quando Bain e Griffith relataram seus resultados em um sistema Fe-Cr-Ni e mencionaram a existência de um campo compreendendo duas fases em equilíbrio: austenita e ferrita.

Anos mais tarde, as primeiras toneladas de aço duplex foram produzidas e estudadas. Em 1930, a empresa suíça Avesta Jernverk desenvolveu duas ligas de aço duplex: a 453E (com composição de 25% de Cr. e 5% de Ni) e a 453S (com composição de 27% de Cr, 5% de Ni e 1,5% de Mo). Os resultados de resistência à corrosão intergranular em testes com águas salinas se mostraram excelentes e incluíram esses aços na lista de produção da empresa. (ALVAREZ-ARMAS, I. [8] e GUNN, R.N. [9]).

Em 1947, uma nova liga duplex, UR50 (contendo 21% de Cr, 7% de Ni, 2,5% de Mo, 1,5% de Cu e 0,07 de N) se tornou padrão nos navios franceses. Nesta época, o controle de oxigênio, enxofre e carbono não era satisfatório e frequentemente os produtos produzidos com a liga UR50 apresentavam trincas e características frágeis. (ALVAREZ-ARMAS, I. [8] e GUNN, R.N. [9]).

Segundo ASM HANDBOOK [6] e GUNN, R.N. [9], o tipo de aço mais frequentemente empregado na década de 1960 foi o AISI 329. Nesta época, adições de nitrogênio ainda não eram intencionalmente acrescentadas e este tipo de aço era predominantemente ferrítico. Somente com a introdução dos processos de VOD (Vacuum Oxygen Decarburisation) e AOD (Argon Oxygen Decarburisation) foi possível produzir aços duplex com baixo teor de enxofre, oxigênio e outros elementos com propriedades controladas. (ALVAREZ-ARMAS, I. [8] e GUNN, R.N. [9]). Um dos primeiros aços a ser produzido usando estes processos foi o AVESTA

3RE 60, sendo introduzido no mercado por volta de 1972 e tinha cerca de 40% em volume de austenita. (ASM HANDBOOK. [6]).

Mais tarde, foi desenvolvido o aço DIN W. Nr. 1.4462, padronizado na Alemanha. Possuía alta resistência a corrosão e sua composição é frequentemente empregada nos dias de hoje.

2.4.2 Características do Aço Inoxidável Duplex

Os aços inoxidáveis duplex são ligas Fe-Cr-Mo que possuem o nitrogênio como elemento de liga, substituindo principalmente o níquel. Essa substituição do níquel pelo nitrogênio melhora tanto as propriedades mecânicas (WESSLING, W.; BOCK, H.E. [10]) como a resistência à corrosão (STREET, J. [11]).

As propriedades superiores são conseguidas através da composição química e do tratamento termomecânico durante a laminação das chapas (SNAPE, E.; CHURCH, N.L. [12] e GIBSON, R. [13]). Esses dois fatores produzem um aço inoxidável com uma microestrutura balanceada, composta de aproximadamente 50% de ferrita e 50% austenita. A figura 2.9 mostra a microestrutura de um aço inoxidável duplex.

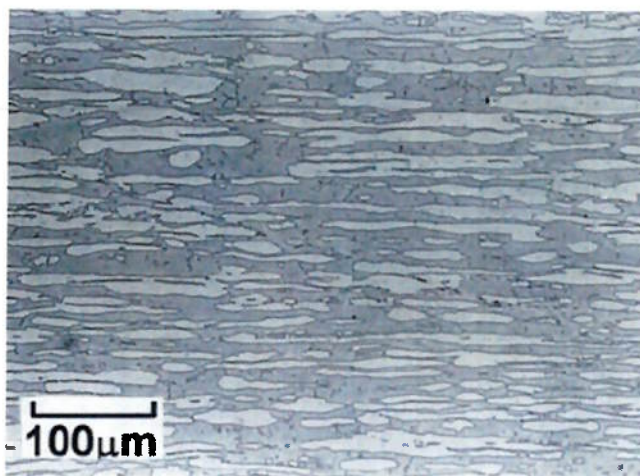


Figura 2.9 – Microestrutura típica do aço duplex UNS S32205 (na condição solubilizada)

Fonte: CHEN, T.H., Yang, J.R. [14]

A distinção entre aços inoxidáveis duplex e superduplex está na composição química. Um aço inoxidável é classificado como duplex quando o índice de resistência a corrosão por pites (IP) é menor que 35. (Brandi, S.D. [15]).

Em termos de metalurgia da soldagem, ambas as classificações apresentam, basicamente, as mesmas transformações de fase que poderão afetar o desempenho da junta soldada.

2.4.3 Transformações de Fase

Os aços inoxidáveis duplex apresentam algumas características típicas em termos de metalurgia que são de fundamental importância para o entendimento das transformações de fase que ocorrem durante a soldagem e estão diretamente relacionadas com a soldabilidade desses aços inoxidáveis. Estas transformações caracterizadas como fases intermetálicas não serão estudadas neste trabalho.

2.4.4 Aço inoxidável duplex fundido

Uma categoria de aços inoxidáveis, relativamente nova nas aplicações Brasileiras, denominada duplex fundido reúne algumas características de forma satisfatória. Tal material surgiu na década de 70 nos Estados Unidos e na Europa e somente a partir da década de 90 vem sendo utilizada no Brasil.

Apesar desse tipo de aço apresentar um bom desempenho em serviço, o processo de obtenção de uma peça por meio de fundição é bastante difícil, devido ao fato da metalurgia física desse sistema ser muito complexa.

O sucesso na obtenção de componentes fundidos em aço inox duplex está relacionado principalmente em exercer um controle eficaz sobre a precipitação da

fase sigma durante o resfriamento de solidificação, pois esse intermetálico reduz de forma acentuada a tenacidade do material.

Componentes obtidos pelo processo de fundição que possuam paredes relativamente espessas (acima de 5 polegadas), resfriam-se, durante a solidificação, de forma muito lenta favorecendo com isso a precipitação em grande escala (acima de 15% em volume) da fase sigma.

Nos aços inoxidáveis duplex obtidos pelo processo de fundição em moldes de areia, torna-se praticamente impossível evitar a precipitação da fase sigma durante a solidificação devido à baixa velocidade de resfriamento, embora seja possível minimizar a sua concentração volumétrica na microestrutura através de conceitos metalúrgicos e do conhecimento sobre os efeitos de cada elemento químico na cinética de precipitação deste intermetálico.

O tratamento térmico de solubilização, seguido por resfriamento em água, promove a completa dissolução da fase sigma e de outros intermetálicos e fases carbônicas que precipitam durante a solidificação desde que seja executado adequadamente, pois trata-se de difusão atômica, que é uma função de variáveis: tempo e temperatura, e os átomos que devem se mobilizar (cromo e molibdênio) são relativamente grandes quando comparados ao átomo de ferro.

As fases presentes na microestrutura bruta de fundição possuem coeficientes de expansão térmica diferentes e isso pode causar um estado de tensões residuais tão elevado que muitas vezes o fundido trinca por completo, sendo impossível sua recuperação. Em alguns casos, esse estado de tensões não chega a ultrapassar o limite de resistência do material e não se rompe, porém, microfissuras são nucleadas na microestrutura e quando agravadas pelo estado de tensões internas começam a se propagar com o tempo, levando a uma falha (ruptura) do

componente em operação, principalmente quando estiver sujeito a pressões de trabalho. Em face desta dificuldade, o controle total sobre a microestrutura bruta de fundição tem sido o grande desafio dos fabricantes de aços inox duplex fundidos.

2.4.5 Características do Aço Inoxidável Duplex UNS S32205

O aço inoxidável dúplex mais conhecido é o UNS S32205, que possui ampla utilização nas indústrias químicas, de óleo, gás, papel e celulose, e é aplicado principalmente em evaporadores, dutos e tanques de condução e armazenamento de material corrosivo. A composição química típica deste material é 22% Cr – 5% Ni – 3% Mo – 0.15% N – 0.02% C (BUDGIFVARS. S.[16]).

Quanto às propriedades mecânicas, o material ocupa um lugar de destaque, pois possui um limite de resistência à tração de 770 MPa, limite de escoamento próximo de 515 e alongamento em 50mm de 32% (BUDGIFVARS. S.[16]). Diversos autores mencionam a possibilidade de soldagem no aço SAF 32205 sem prejuízo das propriedades mecânicas e de resistência à corrosão. Sua utilização em condições criogênicas, no entanto, não é possível por apresentar transição gradual de comportamento dúctil-frágil (BUDGIFVARS. S.[16]).

Com relação à fadiga, os aços dúplex apresentam limites bem definidos. O aço SAF 2205 apresenta limite de fadiga da ordem de 285 MPa, ou 63% do seu limite de escoamento (BUDGIFVARS. S.[16]).

Em aços trabalhados mecanicamente, como é o caso do UNS S32205, observa-se estrutura altamente refinada (a espessura média das lamelas é de 3mm), o que leva aos consideráveis valores de resistência mecânica citados. Isso ocorre, pois quanto maior é a deformação imposta, mais as áreas de austenita e ferrita tornam-se alongadas e finas aumentando o bandeamento e levando à formação de

estruturas cada vez mais refinadas. A resistência mecânica é proporcional a espessura das bandas de ferrita e austenita que pode ser calculada ou que comporta-se como uma relação do tipo Hall-Petch (BUDGIFVARS. S.[16]).

A alta tenacidade deste aço é resultado não somente do pequeno tamanho de grão, mas também da forte presença de austenita em sua estrutura.

Tabela 2.1 – Composição química nominal de um aço inoxidável

Elemento	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	C	P	S
% em peso	21-23	5,5	2,5-3,5	<1,0	<1,0	0,08-0,2	0,03	0,03	0,02

Fonte: Norma ASTM A 182 11a Gr.F51 [17]

2.4.6 Metalurgia da Soldagem

A metalurgia da soldagem dos aços inoxidáveis duplex deve ser estudada baseando se nas transformações de fase que ocorrem na junta soldada (zona fundida e zona afetada pelo calor) e que afetam a fração volumétrica de austenita. Quando o enfoque está na zona fundida, existe a possibilidade de mudança da composição química da poça de fusão, adicionando-se elementos austenitizantes e, conseqüentemente sendo possível obter uma microestrutura mais próxima das frações volumétricas do metal da base. Por outro lado, na zona afetada pelo calor, a microestrutura balanceada deve ser controlada pela história térmica, ou seja, pela velocidade de resfriamento e pela temperatura máxima atingida nas diversas regiões ao redor do cordão de solda. Após a soldagem, a junta pode também atingir a fração volumétrica de austenita próxima da do metal de base.

As características dos aços Inoxidáveis duplex podem ser significativamente afetadas pelo processo de soldagem. Devido à importância de se manter o balanço microestrutural e evitar a formação de fases indesejáveis, os parâmetros de soldagem e os metais de adição empregados devem ser cuidadosamente

especificados. O balanço microestrutural do material base (neste caso, proporções semelhantes de austenita e ferrita) é afetado pelo ciclo térmico do processo de soldagem. Se este balanço for alterado significativamente e as duas fases não tiverem mais proporções semelhantes, a perda de propriedades do material pode ser acentuada. Segundo LIPPOLD [18], é bastante difundido que fragilização dos aços inoxidáveis duplex pode ser causada pelos processos de soldagem, pois estes acarretam modificações microestruturais e precipitação de fases secundárias (fase sigma, carbeto e nitreto, por exemplo) na zona afetada pelo calor.”

Segundo vários autores, dentre eles ALVAREZ-ARMAS, I. [8] e GUNN, R.N. [9], tais materiais começam a solidificação pela fase ferrítica. Durante o resfriamento, mas ainda em altas temperaturas (da ordem de 1300°C), a austenita começa a nucleação e o grão cresce, primeiramente nos limites dos grãos de ferrita e, posteriormente seguindo as direções cristalográficas preferenciais dentro dos grãos de ferrita. Durante este processo em que ferrita transforma-se em austenita ocorre a difusão dos elementos de liga presentes, com os elementos estabilizadores da austenita (carbono, níquel, nitrogênio e cobre) e da ferrita (cromo, molibdênio e tungstênio) se concentrando nas respectivas fases. A extensão desta transformação depende não somente do balanço entre estes elementos estabilizantes presentes na liga, mas também do tempo disponível para a difusão destes elementos ocorrer. De fato, é possível resfriar bruscamente um aço inoxidável duplex e se obter uma estrutura quase 100% ferrítica próximo a temperatura ambiente. Resfriamento lento, recozimento, e trabalho a quente são ações que promovem a transformação da ferrita em austenita por permitir a difusão (ASM HANDBOOK [6]).

Segundo SOLOMON e DEVINE [19], caso as taxas de resfriamento entre as temperaturas de 1200 a 800°C sejam altas a precipitação de austenita é

prejudicada, provocando o aparecimento de precipitações de nitreto de cromo na matriz ferrítica. Além disso, segundo FEDELE et al. [4] se o material for aquecido a temperaturas próximas a 1000°C, sua microestrutura não é estável, podendo ocorrer a precipitação de fase sigma e nitreto de cromo. Conforme ASM HANDBOOK [6], caso ocorra intensa precipitação destas fases indesejadas, pode ocorrer perda de resistência à corrosão e em alguns casos perda de tenacidade.

Os metais de adição utilizados juntamente com aços inoxidáveis são invariavelmente escolhidos com base em sua aplicação e características de resistência à corrosão. Isto significa que usualmente os metais de adição devem, no mínimo, ter teores de elementos de liga específicos (por exemplo: cromo, níquel, molibdênio, etc.) semelhantes ou superiores. Já que tipicamente o balanço austenita/ferrita na liga torna-se menor, ou seja, com menor quantidade de austenita, os consumíveis utilizados nos processos de soldagem geralmente são enriquecidos com níquel, com a finalidade de estabilizar a austenita no metal de solda até níveis encontrados no metal base (ASM HANDBOOK [6]).

2.5 Processo de soldagem

Após uma breve abordagem sobre processo de fabricação de materiais fundidos e aços inoxidáveis, será apresentado a seguir o processo de soldagem utilizado para a união dos elementos, possibilitando a sua extensão de acordo com as especificações deste projeto.

2.5.1 Processo de soldagem TIG

Conforme define BRANDI, S. ([20], p. 60), o processo de soldagem TIG

(...) utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a soldar. A proteção da região de soldagem é feita por um fluxo de gás inerte. A soldagem pode ser feita com ou sem metal de adição e pode ser manual ou automática.

O processo TIG ou Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), foi desenvolvido na década de 40 devido a uma crescente necessidade de uma técnica mais eficaz para soldagem de alumínio e outros materiais, largamente utilizadas na indústria aeronáutica no começo da Segunda Grande Guerra.

Tal processo consiste no aquecimento obtido por meio de um arco elétrico gerado com auxílio de um eletrodo não consumível de tungstênio, devido a sua temperatura de fusão ser em torno de 3400°C. A poça de fusão e o eletrodo são protegidos por uma atmosfera de gás inerte que não reage com outros materiais, podendo ser Argônio ou Hélio. No processo, pode-se utilizar metal de adição ou não (sendo esta última denominada solda autógena). (BRACARENSE A. Q. [21]).

Muitos fatores são determinantes para a confiabilidade da junta soldada como: comprimento do arco elétrico, velocidade de soldagem, vazão do gás, corrente de soldagem, entre outros. O comprimento do arco é a distância entre a ponta do eletrodo e o metal a ser soldado. Com o aumento do comprimento faz aumentar também a tensão do arco, sob uma dada corrente de soldagem e determinado gás de proteção, ocasiona assim um alargamento no cordão de solda e diminuição na penetração do mesmo. Um arco muito curto ou muito longo, torna-se instável, favorecendo a formação de porosidades, mordeduras e falta de fusão. (BRACARENSE A. Q. [21]).

A velocidade de soldagem tem relação direta com a penetração e a largura do cordão: quanto maior for a velocidade de soldagem, menor será a largura do

mesmo, favorecendo possíveis descontinuidades na junta soldada, bem como falta de penetração e mordeduras.

A vazão gasosa deverá ser o suficiente para deslocar o ar atmosférico da poça de fusão proporcionando a proteção do arco elétrico e metal líquido, no entanto uma vazão elevada de gás pode causar turbulência no fluxo de gás e causar possíveis descontinuidades inerentes ao processo.

Os principais gases inertes utilizados na soldagem TIG são o argônio e o hélio, ou ainda a mistura destes dois gases, que são escolhidos de acordo com o material a ser soldado ou de outras características determinadas pelo processo de soldagem.

O autor BRACARENSE A. Q. [21] afirma que o processo TIG, demonstrado na Figura 2.10, possui como vantagens a realização de soldagens de alta qualidade, a aplicação em grande parte dos materiais metálicos, a estabilidade na poça de fusão e, devido à concentração da fonte de calor, menor zona afetada pelo calor (ZAC) e, conseqüentemente, menos distorções na peça soldada. Em contrapartida, apresenta baixa taxa de deposição, ou seja, menor produtividade e impossibilidade de utilizar o processo em locais com a presença de correntes de ar.



Figura 2.10 – Processo de soldagem TIG.
Fonte: Poliend

2.5.1.1 Descontinuidades inerentes aos processos de soldagem TIG

Considerando as diversas possibilidades de aplicação em materiais fundidos do processo de soldagem TIG, é importante considerar a possibilidade de ocorrência de descontinuidades e/ou defeitos nas juntas soldadas, que podem ser produzidas por diversas variações do processo em sua execução.

Para o referido trabalho, abordaremos os principais tipos de descontinuidades provenientes ao processo, como falta de fusão, falta de penetração, trinca e porosidade.

A norma Petrobras N-1738/2003 ([22], p. 2) define que

Descontinuidade é a interrupção das estruturas típicas de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas. Não é necessariamente um defeito. A descontinuidade só deve ser considerada defeito, quando, por sua natureza, dimensões ou efeito acumulado, tornar a peça inaceitável, por não satisfazer os requisitos mínimos da norma técnica aplicável.

2.5.1.1.1 Falta de fusão

Pela definição da norma Petrobras N-1738/2003 ([22], p. 3), a falta de fusão se caracteriza como a “*fusão incompleta entre a zona fundida e o metal de base ou entre passes da zona fundida, podendo estar localizada na zona de ligação, entre os passes ou na raiz da solda*”.

Classificada como um defeito planar e uniforme, a falta de fusão é inaceitável pela maioria dos critérios de aceitação de normas nacionais e internacionais, pois sua presença na solda reduz significativamente a resistência da junta soldada e cria pontos de concentração de tensão no seu interior, podendo originar fissuras quando

a peça está em operação ou submetidas a esforços mecânicos, principalmente em condições onde o carregamento estrutural é classificado como cíclico, causando assim falhas das estruturas.



Figura 2.11 – Falta de fusão
Fonte: Poliend

2.5.1.1.2 Falta de Penetração

A falta de penetração, definida pela norma Petrobras N-1738/2003 ([22], p. 3) como “*insuficiência de metal na raiz da solda*”, pode ser identificada quando não há projeção de solda na raiz da junta soldada na configuração do perfil V, ou quando não existe penetração total do metal de solda em outros perfis, deixando exposta a raiz da junta soldada. É considerada uma descontinuidade linear em sua extensão, mas volumétrica.

Além de reduzir a resistência da condição soldada, passa a ter a sua resistência proporcional à menor espessura existente na peça, ou seja, não proporcionando penetração completa da junta soldada, a falta de penetração cria pontos de concentração de tensão no interior da solda e, conseqüentemente, de

início de trinca ou ruptura quando a peça está em operação ou sob esforços mecânicos.



Figura 2.12 – Falta de penetração
Fonte: Poliend

2.5.1.1.3 Trinca

A trinca, considerada uma das descontinuidades mais graves dos processos de soldagem, caracteriza-se pela norma Petrobras N-1738/2003 ([22, p. 6) como uma “*descontinuidade bidimensional produzida pela ruptura local do material*”. Podendo possuir dimensões microscópicas, denominada por muitas das literaturas e condições práticas como micro-trinca.

Sua nomenclatura possui diversas variações, com base na característica física, localização, orientação no cordão de solda ou na origem de sua formação, conforme citado a seguir:

- *Trinca interlamelar*
- *Trinca longitudinal*
- *Trinca na margem*
- *Trinca ramificada*
- *Trinca sob cordão*

- *Trinca transversal*
- *Trinca de cratera*
- *Trinca irradiante*
- *Trinca na raiz.*

A presença de trincas em uma estrutura soldada é considerada crítica independente de sua localização no perfil soldado, pois não existe apenas a possibilidade de formação de trincas a partir de pontos de concentração de tensão, como também a possibilidade de propagação de uma descontinuidade já existente, no caso de das descontinuidades já apresentadas como falta de fusão e falta de penetração, podendo comprometer toda estrutura do equipamento e sua operação podendo gerar até o rompimento da estrutura soldada ou conjunto carregado.



Figura 2.13 – Imagem de trinca longitudinal
Fonte: Poliend

2.5.1.1.4 Poro/Porosidade

Pelas definições da norma Petrobras N-1738/2003 ([22], p. 4), o poro caracteriza-se por um “vazio arredondado, isolado, interno ou externo à solda”. Para um conjunto ou grupo de poros dá-se o nome de porosidade, caracterizada como “conjunto de poros distribuídos de maneira uniforme, agrupada, alinhada no cordão

de solda. Podendo ocorrer em forma de poros alongados ou em forma de espinha de peixe situados na zona fundida, denominando-se porosidade vermiforme”.

Sendo os poros classificados como descontinuidades de características volumétricas, sua presença em estruturas soldadas contribui na fragilidade ao componente, falta de resistência mecânica e baixa resistência à fadiga, devido ao volume de solda depositado possuir menos metal fundido na composição da junta soldada, pois os gases formadores dos poros/porosidade ocupam volume de material sólido e homogêneo no perfil da secção.



Figura 2.14 – Poro/Porosidade
Fonte: Poliend

2.6 Métodos de ensaios e controle de qualidade

No intuito de avaliar a qualidade de materiais soldados e produtos de diversos processos de fabricação, são utilizados frequentemente métodos de ensaios não destrutivos (END), que consistem em técnicas de inspeções de qualidade que não danificam o material, podendo ser realizadas tanto nas etapas de fabricação, montagem e inspeção final, como também na manutenção dos

equipamentos em serviço. Porém outros métodos de ensaios também são demandados pela indústria em geral, dentre eles os ensaios destrutivos que não serão abordados profundamente neste trabalho, somente para introdução e complemento teórico.

Os ensaios não destrutivos abrangem desde métodos simples e de menor custo para a inspeção de materiais até métodos de maior custo e de alta tecnologia aplicada com o uso de equipamentos complexos e maior nível de exigência de treinamento e experiência dos operadores e inspetores.

Assim, é recomendável que, durante um processo de inspeção de qualidade de um produto e/ou equipamento, as inspeções sejam iniciadas do método de menor custo ao de maior valor agregado. Isso se deve a duas premissas fundamentais no mercado industrial: a) evitar o gasto desnecessário com ensaios de alta complexidade e maior custo, caso a peça seja reprovada em etapas anteriores a um dos ensaios superficiais e, b) identificar uma peça com defeito o quanto antes no processo de produção, para que possa ser providenciado seu retrabalho em busca da qualidade que atenda os requisitos normativos, ou em casos em que este não seja aplicável, interromper a agregação de valor ao produto o mais breve possível.

2.6.1 Ensaios Destrutivos

As propriedades mecânicas constituem uma das características mais importantes dos materiais em suas várias aplicações na engenharia, visto que o projeto e a fabricação de produtos se baseiam principalmente no comportamento destas propriedades.

A determinação das propriedades mecânicas dos materiais é obtida por meios de ensaios mecânicos e químicos realizados no próprio produto ou em corpos

de prova de dimensões e formas especificadas, segundo procedimentos padronizados por normas.

Diferem significativamente dos ensaios não destrutivos, pois há a necessidade de inutilização do corpo ensaiado após solicitações aplicadas e obtenção dos valores. Dentre os ensaios destrutivos comumente utilizados estão: dobramento, tração, compressão, impacto, flexão, ensaio metalográfico, micrografia, dureza e entre outros.

2.6.2 Ensaios Não Destrutivos

Denomina-se ensaio não destrutivo (END) qualquer tipo de ensaio aplicado em materiais ou produto que não influencie ou altere de forma permanente suas propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais. Os END's implicam em ausência de dano ou dano desprezível.

São técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo executados nas diversas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção.

Constituem uma das principais ferramentas do controle da qualidade de materiais e produtos, além de contribuírem no auxílio da fabricação de bens e serviços com a redução de custo, preservação da vida, do meio ambiente, além de agregar competitividade para as empresas que os utilizam.

Dentre as modalidades convencionais usualmente utilizadas, estão: líquido penetrante, partículas magnéticas, ultrassom convencional e radiografia, dos quais estes 2 últimos serão tratados no proposito neste trabalho.

Além dos ensaios descritos anteriormente, existem diversos outros métodos de inspeção de qualidade que integram a área de ensaios não destrutivos, tanto

superficiais como volumétricos. Os ensaios de correntes parasitas, endoscopia industrial, emissão acústica, estanqueidade e termografia são alguns dos exemplos de ensaios classificados como métodos não destrutivos, também possuindo vasta aplicação no mercado industrial, mas não tiveram aplicação direta neste trabalho e, por este motivo, não serão aqui abordados.

2.6.2.1 Ensaio por Líquido Penetrante

O ensaio de líquido penetrante é considerado pela área industrial conforme SILVA, L. ([23], p. 4), como um dos principais métodos de controle de qualidade para a detecção de descontinuidades superficiais em materiais não porosos. No referido ensaio, utiliza-se da capacidade do líquido que é colorido artificialmente, penetrar em pequenas cavidades e/ou orifícios por meio da capilaridade, que é uma das suas fundamentais propriedades físicas, proporcionando após a remoção do seu excesso na superfície em exame a condição ideal para a aplicação de revelador a base de solvente, água ou pó seco que possibilitará contraste de fundo branco com possíveis indicações em cores sensíveis a percepção humana, possibilitando a identificação de descontinuidades no material inspecionado.



Figura 2.15 – Inspeção por líquido penetrante
Fonte: Poliend

Comparado a outros ensaios de mesma finalidade, a inspeção por líquido penetrante (LP) apresenta vantagens que viabilizam a velocidade e a visualização das descontinuidades no ensaio quando realizado na condição ideal e requerido da preparação da superfície. Além de gerar indicações maiores que as descontinuidades reais, pelo fato da indicação ser formada pela extração do volume de líquido contido no interior da cavidade pelo revelador e também devido ao contraste produzido pelo fundo branco com a indicação vermelha ou fluorescente que aumenta assim a percepção visual do inspetor.

Dentre as vantagens desta inspeção pode-se listar: o baixo custo agregado ao valor comercial dos produtos necessários quando comparados a outros ensaios de mesma finalidade, a possibilidade de aplicação em diversos tipos de materiais independente de suas características químicas, apenas com a limitação de aplicação em materiais porosos, a alta sensibilidade para detecção de descontinuidades superficiais, que devem estar abertas a superfície e a possibilidade de emprego em peças e equipamentos de geometrias simples e complexas, conforme pode ser visto na Figura 2.15 acima.

Assim como todos em os métodos de inspeção de qualidade, e principalmente pela característica não destrutiva, o ensaio por Líquido Penetrante também apresenta limitações em algumas de suas aplicações. Entre estas limitações estão a impossibilidade de detectar descontinuidades internas onde não é possível a introdução do líquido capilar na cavidade, além de não dimensionar a profundidade e direção interna de uma descontinuidade encontrada. Não poder ser aplicado em materiais porosos e necessitar a utilização de esmeril para limpeza de superfícies jateadas uma vez que o acabamento superficial e a limpeza interferem diretamente na abertura e obstrução dos orifícios das descontinuidades.

Dentre os diversos métodos e técnicas de execução existentes para a realização do ensaio por Líquido Penetrante o método colorido removido com água será utilizado como ensaio complementar no objetivo deste trabalho, não sendo aqui abordados outros métodos por não ser o objeto da pesquisa.

2.6.2.2 Ensaio por Partículas Magnéticas

O método de ensaio é baseado na geração de um campo magnético que percorre toda a superfície da peça em ensaio, sendo proporcionado pela característica e intensidade ferromagnética do material.

Largamente utilizado nas indústrias de modo geral, trata-se de um método de ensaio muito eficiente na detecção de descontinuidades superficiais e sub-superficiais (milímetros abaixo da superfície), conseqüentemente definidas pela escolha ideal do modo de magnetização e geometria do produto em inspeção. Dentre as modalidades que são empregadas estão: técnica de indução de campo por corrente e técnica de indução de fluxo.

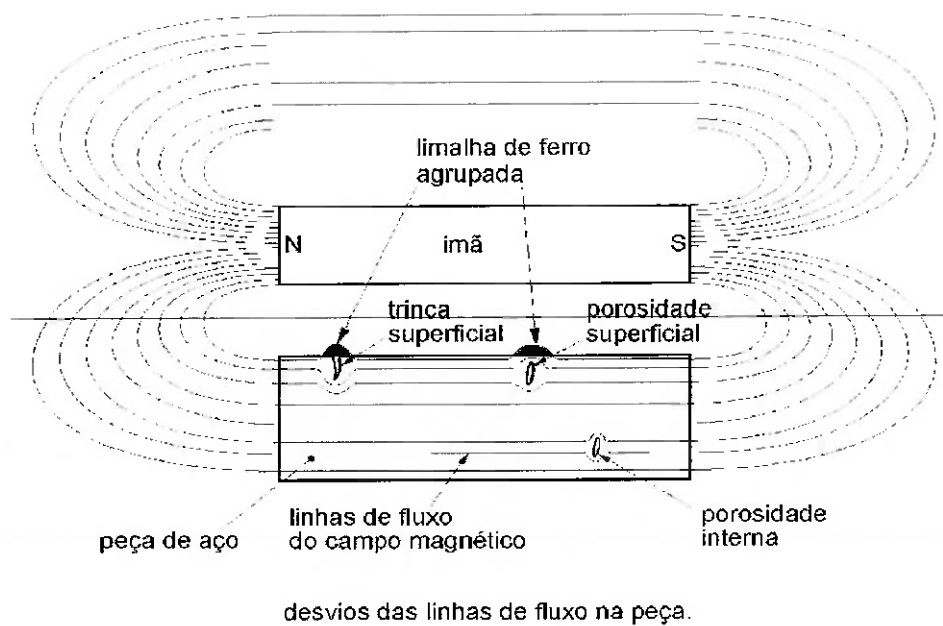


Figura 2.16 – Indução de fluxo magnético
 Fonte: Apostila Técnica em Mecânica - 2000

A escolha ideal da melhor técnica baseia-se nas condições físicas do equipamento em inspeção (acesso em áreas restritas) e características da superfície, pois condições polidas de usinagem requerem cuidados no manuseio dos polos de contato a fim de evitar aberturas de arco pela intensidade de corrente do circuito. Neste caso, utiliza-se a técnica de indução de fluxo (conforme Figura 2.16) pela portabilidade e cuidados requeridos. Vale salientar que será a técnica utilizada no complemento da elaboração deste trabalho, somente no intuito de visualizar o resultado da indução de fluxo magnético em produtos de características austeníticas e ferríticas.

As linhas magnéticas do fluxo induzido no material desviam-se de sua trajetória ao encontrar a descontinuidade posicionada perpendicularmente a sua direção, gerando o que se denomina como campo de fuga (eletroímã), atraindo as partículas ferromagnéticas (pulverizadas simultaneamente a magnetização) para a região potencialmente magnetizante. Alguns exemplos típicos de aplicações deste método são em materiais fundidos de aço ferrítico, materiais extrudados, soldados,

laminados, forjados, peças induzidas a tratamento térmico e muitas outras aplicações em materiais ferrosos.



Figura 2.17 – Inspeção por partículas magnéticas por indução de fluxo.
Fonte: Poliend

2.6.2.3 Ensaio Radiográfico

Conforme a definição de SILVA JR., S. e MARQUES, P. ([24], p. 15),

“(...) o ensaio radiográfico baseia-se na absorção diferenciada da radiação pela matéria. Consiste, basicamente, em fazer passar um feixe de radiação X, radiação γ ou nêutrons através de um objeto em estudo e registrar as características da radiação emergente do objeto utilizando um meio adequado, como um filme radiográfico, uma tela fluorescente ou dispositivos eletrônicos de detecção de imagem radiográfica.”

Desta forma, o ensaio radiográfico trabalha com níveis de radiação absorvida e não absorvida pelo material, de forma a registrar, em tons de cinza, a passagem da radiação pelo material inspecionado. BALDEV RAJ, T. [25], afirma que, quanto menor for a densidade do material, ou se existirem descontinuidades caracterizadas pela falta de material, como as porosidades, mais escura a imagem irá aparecer. Por outro lado, caso haja maior densidade, espessura ou descontinuidade que crie uma

maior absorção do feixe radioativo, como no caso da inclusão de tungstênio, a imagem aparecerá mais clara.

Em outras palavras, quanto maior a absorção da radiação pelo material, mais clara a imagem irá aparecer.

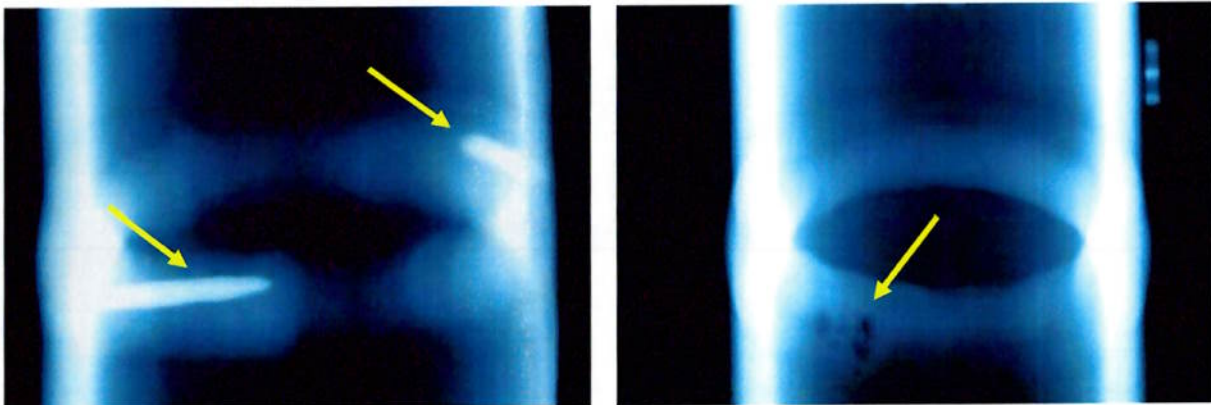


Figura 2.18 – Filmes de ensaio radiográfico de tubulações. (a) inclusão de tungstênio (b) porosidade.
Fonte: Poliend

Como é possível observar na figura acima, na imagem A, são apresentadas inclusões de tungstênio, em indicações mais claras quando comparadas ao material de base. Na imagem A, o tungstênio absorve maior nível de radiação do que o aço carbono, deixando esta região do filme mais clara. Na imagem B, pode ser verificada a presença de porosidade, em indicações mais escuras do que o material de base. O poro, caracterizado como uma descontinuidade onde há ausência de material, deixa-se transmitir maior nível de radiação, escurecendo o filme nesta região.

O ensaio radiográfico é utilizado para a inspeção de materiais com o objetivo de detectar descontinuidades internas e possui vantagens e desvantagens como qualquer outro tipo de ensaio. Embora este ensaio permita a detecção de descontinuidades internas com alto grau de sensibilidade e registro permanente dos resultados do ensaio, é um ensaio de custo elevado devido à tecnologia envolvida em sua aplicação e exige um grande cuidado com a segurança do local onde é realizado, devido a utilização de radiações ionizantes.

Uma das principais limitações do ensaio radiográfico, apresentada por COSTA E SILVA, A. e MEI, P. [26] é a dificuldade de detecção dos defeitos planares em relação à sua orientação com a fonte de radiação. Segundo estes autores, o ensaio radiográfico detecta facilmente descontinuidades volumétricas, ou 3D, já que estas apresentam uma grande área de absorção diferenciada do feixe de radiação em relação ao metal de base. Já para as descontinuidades lineares, ou 2D, o ensaio depende muito de uma orientação favorável da descontinuidade em relação à fonte e ao filme, podendo passar despercebida no ensaio devido à área reduzida de absorção da radiação. Considerando que, do ponto de vista da mecânica da fratura, os defeitos planares são os mais críticos, esta limitação do ensaio radiográfico torna-se um ponto bastante relevante no momento de definição das inspeções de qualidade de um material.

O ensaio radiográfico para aplicações industriais pode ser realizado por duas técnicas distintas, através de uso de radiação X ou radiação gama, sendo que cada uma das técnicas possui suas particularidades. As principais diferenças entre os a utilização de raios X e raios gama serão apresentadas a seguir.

A utilização do ensaio radiográfico será de grande importância no complemento da realização deste trabalho, possibilitando verificar por meios comparativos a eficiência da técnica proposta em estudo.

2.6.2.3.1 Raios X (Radiografia)

De acordo com ANDREUCCI, R. ([27], p. 12), os raios X são emitidos a partir das camadas eletrônicas dos átomos e são produzidos dentro de uma ampola de vidro que possui duas partes distintas: ânodo e cátodo. Conforme a definição deste autor,

“O ânodo é constituído de uma pequena parte fabricada em tungstênio, também denominado de alvo e o cátodo de um pequeno filamento, tal qual uma lâmpada incandescente, por onde passa uma corrente elétrica da ordem de miliamperes.

Quando o tubo é ligado, a corrente elétrica do filamento, se aquece e passa a emitir espontaneamente elétrons que são atraídos e acelerados em direção ao alvo. Nesta interação, dos elétrons com os átomos de tungstênio, ocorre a desaceleração repentina dos elétrons, transformando a energia cinética adquirida em Raios X.”

De forma geral, é possível afirmar que os raios X são produzidos a partir de uma corrente elétrica e são caracterizados por apresentar um espectro contínuo de emissão da radiação, ou seja, a energia de radiação emitida por um aparelho de raios X varia de forma contínua.

O autor afirma que o calor advindo do processo de emissão dos raios X é considerável, sendo necessário trabalhar com sistemas de refrigeração do ânodo, que podem ser realizados por irradiação, convecção ou circulação forçada de água.

Os equipamentos de emissão de raios X para uso industrial são compostos por dois elementos fundamentais: o painel de controle e o cabeçote, também conhecido como unidade geradora, além dos acessórios que contribuem para o correto funcionamento da aparelhagem como cabos de energia, blindagem e aceleradores lineares. No painel de controle encontram-se os controles, indicadores, chaves, medidores e o circuito gerador de alta tensão. É nesta área do equipamento que se controlam a tensão e corrente a ser utilizadas no ensaio. No cabeçote estão contidos a ampola e o sistema de refrigeração aplicado. A conexão entre o este e o painel de controle é realizada através de cabos específicos de alta tensão.

Ainda conforme ANDREUCCI, R. [27], as principais características que definem a capacidade de operação do aparelho de raios X são a tensão e corrente

elétrica máximas, o tamanho do ponto focal, o tipo de feixe de radiação, o peso e o tamanho do equipamento, pois estas características definem a portabilidade do ensaio, a espessura dos materiais a serem inspecionados e o ângulo de emissão da radiação em relação à peça ensaiada.

Outras características importantes relacionadas aos raios X são a qualidade e a intensidade da radiação produzida. Basicamente, este autor define a qualidade como a capacidade de penetração da radiação nos materiais – grandeza diretamente ligada à tensão onde, quanto maior for a tensão utilizada no aparelho, maior será a energia da radiação e menor será seu comprimento de onda e, conseqüentemente maior será sua penetração no material, e a intensidade da radiação como a quantidade de raios X produzidos – característica ligada à corrente e ao tempo de exposição da radiação oride, quanto maior for a corrente utilizada, ou quanto maior o tempo de utilização do aparelho, maior será o calor produzido no filamento, que, por sua vez, irá liberar um número maior de elétrons, aumentando a intensidade da radiação gerada.

2.6.2.3.2 Raios Gama (Gamagrafia)

Diferentemente dos raios X, os raios gama não são produzidos por corrente elétrica, mas por fontes de isótopos radioativos produzidos artificialmente através de reações nucleares de ativação, conforme afirma ANDREUCCI, R. [27]. As fontes radioativas necessitam de medidas especiais de segurança, pois, uma vez ativadas, emitem radiação constantemente.

Apesar da radiação emitida por uma fonte não ser cessada nunca, ela decai continuamente ao longo do tempo de acordo com as características de cada elemento radioativo, pois os átomos que emitem radiação sofrem desintegrações,

diminuindo a atividade radioativa da fonte. Desta forma, é possível determinar para cada elemento um intervalo de tempo no qual ele terá exatamente a metade da sua atividade radioativa. Este tempo é denominado “meia-vida” do elemento radioativo.

Pelo fato de não ser possível desativar ou desligar uma fonte radioativa, é necessário um equipamento com sistema de segurança e blindagem eficaz que permita o armazenamento, transporte e operação do equipamento com segurança, bem como a retirada da fonte do seu interior para a realização do ensaio sem que ofereça riscos ao operador. Este equipamento, conhecido como irradiador, é fabricado com alto controle de qualidade e segurança estabelecido por normas internacionais, pois deve ser capaz de resistir a choques mecânicos, incêndios e inundações, de forma a diminuir os riscos de exposição da fonte radioativa.

De acordo com este autor, o irradiador é composto por três elementos básicos: uma blindagem, uma fonte radioativa e um dispositivo para expor a fonte no momento do ensaio. As blindagens podem ser constituídas por diversos materiais, sendo que os mais comuns são chumbo ou urânio, contendo uma proteção externa de aço, que a protege de choques mecânicos. Cada blindagem é dimensionada para conter um elemento radioativo específico, não sendo indicado o seu uso para outros tipos de fontes.

As fontes que ficam localizadas no interior do irradiador são envoltas em cápsulas de material austenítico, impedindo a fuga de radiação para o exterior da fonte. O dispositivo do irradiador para expor a fonte consiste de um cabo de aço flexível no qual a fonte está fixada em uma extremidade e na outra está localizado um engate, que é utilizado para a movimentação e exposição da fonte com segurança.

O sistema de exposição da fonte dos irradiadores pode ser mecânico, com acionamento manual ou elétrico, ou pneumático, de forma que ambos permitam uma distância segura para o operador executar o ensaio radiográfico dentro dos padrões aceitáveis de radiação.

2.6.2.3.2.1 Registro de imagem

A imagem radiográfica reproduzida em filme, tela fluorescente ou equipamento eletrônico capaz de registrar uma imagem de radiografia, pode sofrer diversas alterações em sua qualidade de acordo com a geometria e demais fatores utilizados no ensaio, ou seja, a distância, a posição e o tamanho das fontes utilizados influenciam diretamente na formação da imagem.

Para SILVA JR., S. e MARQUES, P. [24], os efeitos que ocorrem com a formação da imagem radiográfica são semelhantes ao que ocorre com projeções de sombra contra a luz, podendo ocorrer variações de tamanho, distorções, nitidez e formação de penumbras. Caso o plano do filme não esteja perpendicular ao feixe de radiação incidente, há maiores chances de ocorrerem distorções da imagem resultante. Na Figura 2.19 é possível observar as variações na imagem a partir da mudança da distância da fonte em relação ao objeto radiografado.

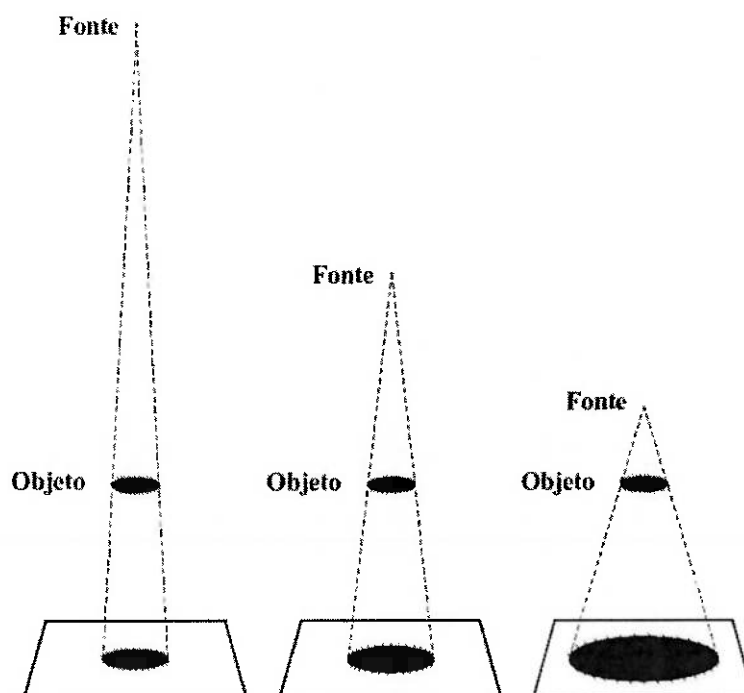


Figura 2.19 – Variações da imagem de acordo com o distanciamento da fonte.

Fonte: SILVA JR., S. e MARQUES, P. [24],p. 25.

Para a checagem da qualidade de imagem formada, são utilizados Indicadores de Qualidade de Imagem (IQI), ou seja, padrões fabricados com o mesmo material da peça radiografada, que são localizados geralmente sobre a peça e radiografados juntamente durante o ensaio, tendo a sua imagem também formada no filme juntamente, estabelecendo um critério para avaliação da qualidade de imagem e, conseqüentemente, da sensibilidade do ensaio.

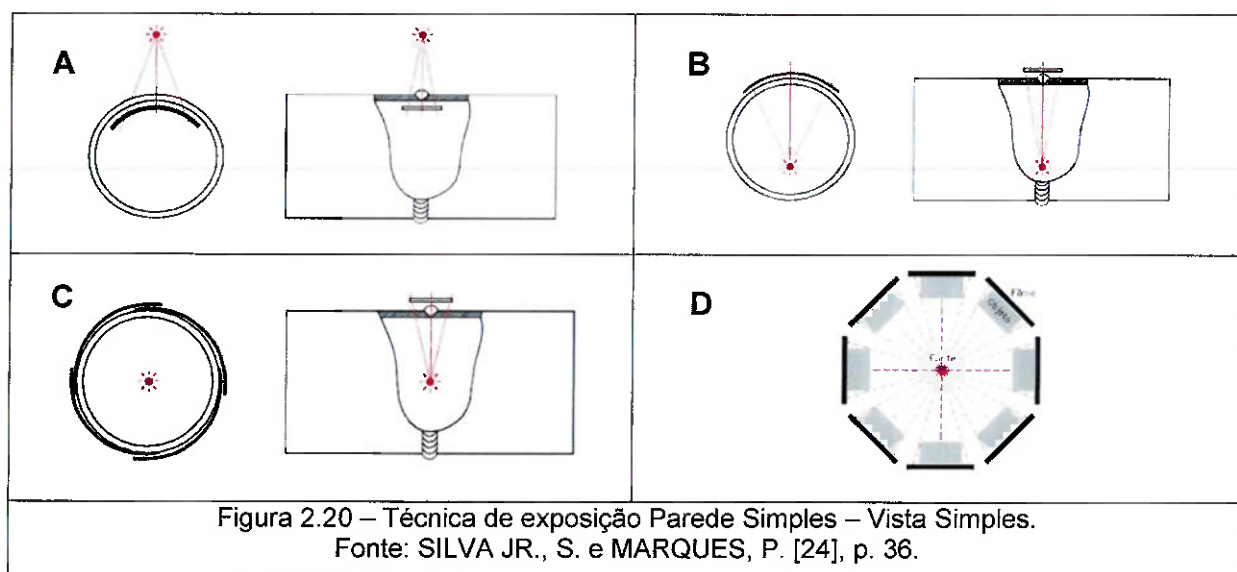
Para auxiliar na garantia da qualidade de imagem, também devem ser aplicadas diversas técnicas de redução do espalhamento do feixe radioativo, uma vez que a radiação que não é absorvida pelo material sofre um espalhamento e continua seu percurso, podendo atingir o filme radiográfico. Caso este espalhamento não seja controlado, pode causar uma redução no contraste do filme radiografado e enegrecimento da imagem, comprometendo o registro do ensaio radiográfico.

2.6.2.3.2 Técnicas de exposição

Conforme mencionado anteriormente, a geometria do ensaio influencia diretamente na obtenção da imagem radiográfica e na sensibilidade do ensaio. Para que a imagem seja obtida com qualidade adequada para posterior análise e laudo, o ensaio deve ser planejado de forma que a imagem resultante permita uma rápida associação entre uma descontinuidade identificada na imagem e a sua localização real na peça em exame. Com o objetivo de garantir a melhor possibilidade de detecção de descontinuidades, as principais técnicas de exposição utilizadas no ensaio radiográfico serão descritas a seguir.

- **Parede Simples – Vista Simples**

Nesta técnica, a fonte radioativa é localizada de forma a atravessar apenas uma parede do material ensaiado e de forma a apresentar no filme apenas a imagem da região de interesse. A figura a seguir representa variações desta mesma técnica, que deve ser aplicada sempre que possível.



Analisando a figura, em A é possível verificar a técnica aplicada com o filme no interior do tubo e a fonte posicionada no exterior. Em B, a fonte está posicionada no interior do tubo e o filme no exterior. Em C, ocorre a mesma técnica aplicada em B, mas com uma sucessão de filmes, que registram todo o perímetro do tubo, gerando uma imagem panorâmica. Em D, uma fonte central emite radiação para inspecionar diversos objetos em uma única exposição. Todas estas variações representam a técnica Parede Simples – Vista Simples.

- **Parede Dupla – Vista Simples**

Esta técnica trabalha com o posicionamento da fonte de modo a atravessar duas paredes do material examinado e de forma a apresentar no filme apenas a imagem da região de interesse, ou seja, da parede mais próxima ao filme. Deve ser utilizada nos casos em que não existe acesso ao interior do componente. Para o uso desta técnica, são necessárias no mínimo 3 radiografias, uma para cada 120° do tubo, para que seja garantida a cobertura total do seu perímetro.

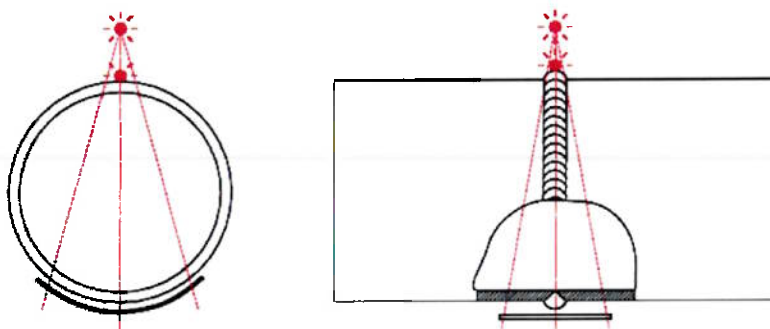


Figura 2.21 – Técnica de exposição Parede Dupla – Vista Simples.
Fonte: SILVA JR., S. e MARQUES, P. [24], p. 38.

- **Parede Dupla – Vista Dupla**

Nesta técnica, o posicionamento da fonte deve ser realizado de modo a atravessar duas paredes do material examinado e de forma a apresentar no filme a imagem das duas espessuras atravessadas, formando uma elipse. Esta técnica é utilizada quando não há acesso ao interior do componente, principalmente para a inspeção de tubulações com diâmetros menores do que 3 ½ polegadas. A fonte deve estar deslocada do centro do da área de interesse, de modo a registrar as duas espessuras sem sobreposição.

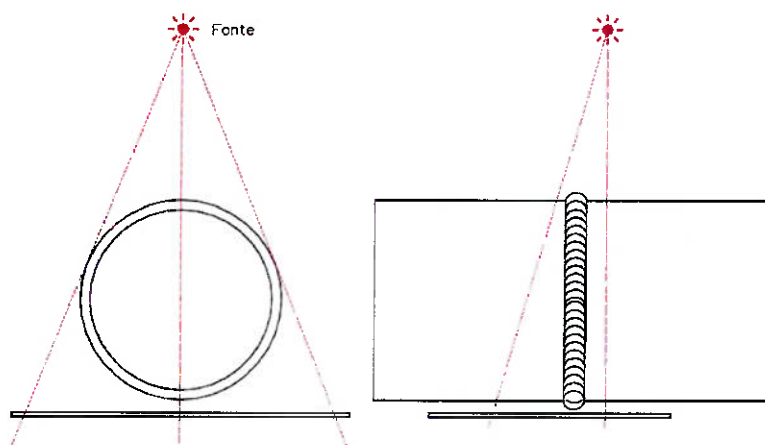


Figura 2.22 – Técnica de exposição Parede Dupla – Vista Dupla.
Fonte: SILVA JR., S. e MARQUES, P. [24], p. 39.

2.6.2.3.2.3 Etapas de execução do ensaio

Em resumo, as etapas necessárias para a execução do ensaio radiográfico devem ser desenvolvidas conforme descrito a seguir:

Preparação superficial: Devem ser eliminadas quaisquer irregularidades que possam mascarar o ensaio ou serem confundidas com descontinuidades, principalmente em soldas de projeção quando não há possibilidade de acesso visual

em regiões restritas, ocorrendo de forma intensa em soldagem de tubulações de baixo diâmetro. Dentre as irregularidades que muito dificulta a execução do laudo radiográfico, são as mordeduras, localizadas em regiões adjacentes ao cordão de solda, na qual requer muita experiência do inspetor na identificação da descontinuidade, principalmente quando não há acesso para verificação visual no local.

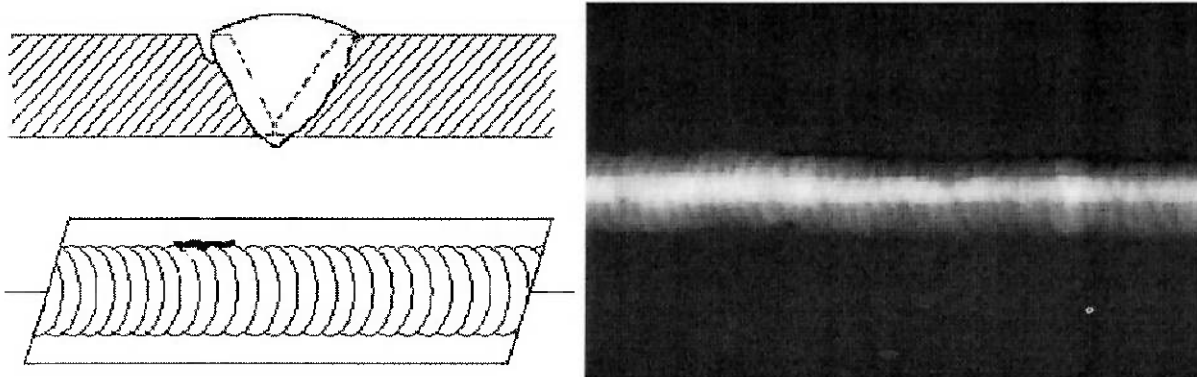


Figura 2.23 – Visualização de mordedura na margem da solda.
Fonte: American Society of Mechanical Engineers [28]

Montagem de chassi: Posicionamento do filme na tela intensificadora e inserção da etiqueta de identificação com as características da junta a ser inspecionada, etapa na qual é executada em câmara escura.

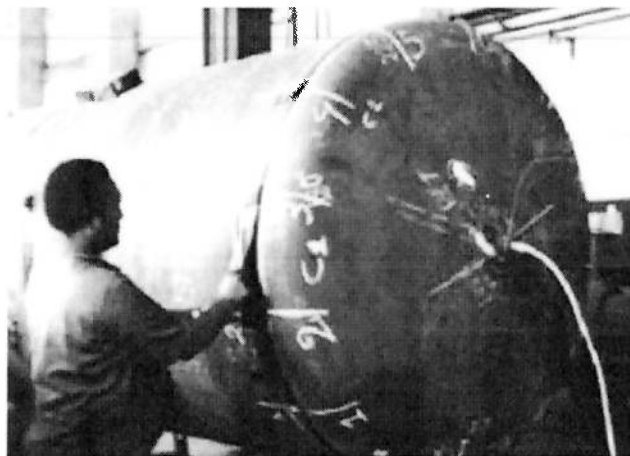


Figura 2.24 – Montagem de chassi no equipamento
Fonte: Site ABENDI [29]

Posicionamento dos equipamentos: Posicionar a peça ou equipamento de forma a facilitar a logística e acesso às regiões de interesse, possibilitando a montagem do chassi, bem como o IQI e o irradiador na posição adequada, de acordo com o tempo de exposição determinado pelo cálculo e a pela técnica de exposição escolhida, em função das características do equipamento.

Acionamento do sistema de segurança: Isolar a área de ensaio no ambiente, que geralmente encontra-se em ambiente fabril e área industrial e iniciar a sinalização sonora e/ou luminosa, sendo muito comum a utilização de isolamento físico através de fita “zebrada” com objetivo de evitar a aproximação de pessoas na área de emissão radioativa durante a realização do ensaio.

Exposição: Iniciar a exposição do filme radiográfico ao feixe radioativo e finalizá-la após o tempo de exposição calculado.

Guarda dos equipamentos: Retirar todo isolamento em torno da área de exposição e recolher o irradiador com a fonte radioativa, armazenando-os em local seguro, geralmente em bunker adaptado para os devidos fins. Vale ressaltar que, quando a condição dimensional do equipamento ou produto em inspeção possibilita fácil logística, não há necessidade de execução do ensaio em áreas transitáveis e de deslocamento de pessoas, podendo ser realizado em bunkers específicos para tal finalidade.

Revelação e análise: Revelar o filme radiografado conforme procedimento adotado e analisar a imagem radiográfica no negatoscópio em ambiente escurecido, proporcionando sensibilidade e contraste aos detalhes desejados.

Laudos: É dada pela definição de aprovação ou reprovação do elemento examinado, podendo ser uma junta ou corpo fundido, com base nos limites de aceitação de uma

Norma ou critério de aceitação especificado, de acordo com as características e finalidades do produto.



Figura 2.25 – Execução do laudo no negatoscópio.
Fonte: Site Kodak [30]

Pelo fato de não ser objeto de pesquisa deste trabalho, o ensaio radiográfico foi destinado para execução em empresa terceirizada, não sendo possível o acompanhamento da execução, bem como análise do procedimento operacional.

2.6.2.4 Ensaio por Ultrassom Convencional

O ensaio por ultrassom convencional (US) é definido por SANTIN, J. ([31], p. 5) como

“(...) um método não destrutivo, no qual um feixe sônico de alta frequência é introduzido no material a ser inspecionado com o objetivo de detectar descontinuidades internas e superficiais. O som que percorre o material é refletido pelas interfaces e é detectado e analisado para determinar a presença e localizações de descontinuidades”.

O som refletido no interior do material inspecionado depende basicamente das características físicas das ondas sonoras – velocidade, frequência e comprimento de onda – e das características da estrutura do material por onde estas

se propagam – tamanho de grão, orientação da rede cristalina, densidade, entre outras.

Um fator importante para o ensaio por ultrassom, segundo o autor, é o estado físico da matéria que está em interface com o material inspecionado, pois isso influencia diretamente nas reflexões sonoras. Por exemplo, em uma interface metal (sólido) – gás, as ondas sonoras são quase que totalmente refletidas, facilitando o reconhecimento de discontinuidades que estabelecem este tipo de interface, como poros, trincas, faltas de fusão, entre outras.

O ensaio por ultrassom é amplamente utilizado para a detecção e caracterização de discontinuidades internas, medição de espessura e controle de corrosão de materiais. Como já exposto nos demais ensaios abordados, este também apresenta algumas vantagens e limitações em sua aplicação. As vantagens do ultrassom mais conhecidas na área de END são a alta sensibilidade para detecção de pequenas discontinuidades, o alto poder de penetração, que permite executar a inspeção em grandes espessuras, possibilidade de determinação de posição, tamanho e caracterização das discontinuidades, com laudo imediato após o ensaio, ser um ensaio altamente portátil e não proporcionar efeitos prejudiciais à saúde do inspetor, além de ser um ensaio com grandes avanços na tecnologia relacionada à sua aparelhagem.

Por outro lado, o ensaio de ultrassom apresenta algumas desvantagens que são: a necessidade visualização simultânea do osciloscópio ao movimento de varredura e experiência do inspetor exigindo maior treinamento teórico e prático aos inspetores que os demais ensaios, dificuldades de inspecionar peças muito irregulares com superfície rugosa ou de espessuras muito finas, incapacidade de

detectar descontinuidades muito próximas à superfície, além de exigir o uso de blocos de calibração e referência para a calibração dos aparelhos diariamente.

2.6.2.4.1 Ondas ultrassônicas

MIRANDA, J. e SATO, S. ([32], p. 5) definem resumidamente onda como “o transporte de energia de um ponto a outro do espaço sem ocorrer o transporte de matéria”. As ondas podem ser mecânicas, em que a energia é transportada pela vibração das partículas que compõem um meio material e, logo não se propaga no vácuo, como é o caso do som, ou podem ser eletromagnéticas, em que a energia é transportada através de um campo elétrico e/ou magnético, e, como não depende de um meio material para sua propagação, pode ser transportada pelo vácuo, como é o caso da luz.

É importante apontar alguns conceitos relevantes para o entendimento das ondas sonoras. A distância entre duas cristas ou dois vales é denominada comprimento de onda (λ). A distância entre uma crista, passando pelo vale e terminando no início da crista seguinte é chamada de ciclo. O número de ciclos percorridos em um determinado tempo é chamado de frequência das ondas (f). A altura das cristas ou a profundidade dos vales, em relação a uma linha de equilíbrio ou repouso entre os dois, é denominada amplitude. Estes conceitos podem ser observados resumidamente na figura a seguir.

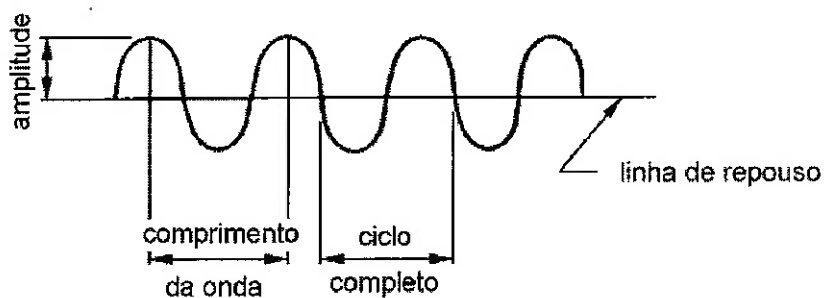


Figura 2.26 – Definições de ondas.
Fonte: Telecurso 2000 [33].

Outros conceitos importantes relacionados às ondas são a sua velocidade, sua amplitude e o decréscimo de energia durante a sua propagação que é, também denominado atenuação. Todas estas características são constantes e dependem diretamente do meio no qual a onda está se propagando.

As ondas ultrassônicas podem ser classificadas de acordo com o modo de deslocamento das partículas, sendo que as que possuem maior aplicação nos ensaios por ultrassom são basicamente descritas a seguir:

- Ondas longitudinais: são ondas de compressão, onde as partículas do material propagam-se no mesmo sentido da onda entre movimentos de compressão e rarefação, como no caso de uma mola pressionada e esticada.
- Ondas transversais: ondas de cisalhamento ou de corte, onde as partículas movimentam-se no sentido perpendicular à propagação da onda, como no caso de uma corda sendo movimentada para cima e para baixo, resultando num movimento perpendicular das ondas.

Existem algumas características em relação ao comportamento das ondas sônicas que são de grande importância para o trabalho com ultrassom que são brevemente descritas a seguir. A primeira delas é a impedância acústica, definida como o produto da massa específica de um material pela sua velocidade sônica. Esta característica define as quantidades de energia refletida e transmitida quando uma onda atinge a interface com outro material.

SANTIN, J. [31] apresenta dois tipos de incidência das ondas sônicas nos materiais: normal e oblíqua. A incidência normal, que ocorre quando uma onda incide sobre um material com um ângulo de 0° , apresenta apenas reflexão e transmissão na energia emitida. Já a incidência oblíqua é caracterizada por atingir a superfície em qualquer ângulo diferente de 0° . Devem também ser considerados outros fenômenos como a conversão de modo, uma mudança no tipo de oscilação ou no tipo de onda e a refração, que é a mudança na direção de propagação das ondas.

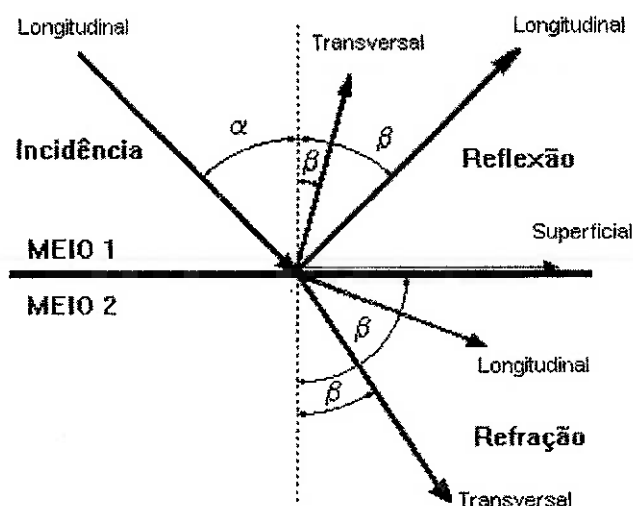


Figura 2.27 – Ondas geradas a partir de uma onda longitudinal incidente.
Fonte: SANTIN, J. [31], p. 23.

A Figura acima apresenta as ondas refletidas ou refratadas que podem ser geradas a partir de uma onda sônica incidente. Para o cálculo dos ângulos

mencionados na figura, utiliza-se a mesma relação utilizada para as ondas de luz, a Lei de Snell, conforme apresentada a seguir:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2}$$

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

Quando o ângulo da onda longitudinal refratada for igual a 90° , significa que o primeiro ângulo crítico da onda incidente foi atingido, permanecendo apenas a onda transversal refratada no segundo meio. Quando o ângulo da onda transversal refratada atingir 90° , ocorre o segundo ângulo crítico. Nestes ângulos, as ondas refratadas funcionam como ondas superficiais que são utilizadas no ensaio por ultrassom para a inspeção de discontinuidades muito próximas à superfície.

Além da impedância acústica, existem outros dois fenômenos de perdas de energia no processo de transmissão das ondas ultrassônicas. Um deles é a absorção, ou seja, a conversão de energia mecânica em energia térmica, que ocorre devido ao movimento elástico das partículas durante a propagação da onda sonora. O outro fenômeno é o espalhamento, que é diretamente relacionado à estrutura cristalina do material e aos tamanhos de grãos que podem desviar pequenas porções de energia do feixe sônico principal.

2.6.2.4.2 Geração e recepção de ondas

SANTIN, J. [31] apresenta diversas formas de gerar e receber ondas ultrassônicas tais como o efeito piezelétrico, choques ou atritos mecânicos, excitação térmica, processos eletrostáticos, eletrodinâmicos e magnetostrictivos.

Destas, será abordado neste trabalho apenas o efeito piezelétrico, que foi o empregado no equipamento utilizado para a realização dos testes realizados neste trabalho.

O efeito piezelétrico está relacionado com a capacidade de alguns cristais, naturais ou artificiais transformarem energia mecânica em energia elétrica e vice-versa. Desta forma estes cristais são denominados transdutores, por serem capazes de, a partir de um estímulo elétrico, emitirem vibrações capazes de gerar ondas ultrassônicas que, quando são recebidas pelo cristal, transformam-se em pulsos elétricos que correspondem a um sinal que pode ser visualizado na tela de um aparelho de ultrassom.

A onda ultrassônica gerada por um cristal propaga energia em todas as direções, formando um feixe sônico. Este campo é basicamente formado por três áreas bastante distintas, denominadas campo próximo – área mais próxima ao cristal, de grande variação da intensidade sônica –, foco – área de melhor focalização do feixe sônico, que determina o fim do campo próximo –, e campo distante, onde o feixe sônico passa a divergir com um ângulo constante.

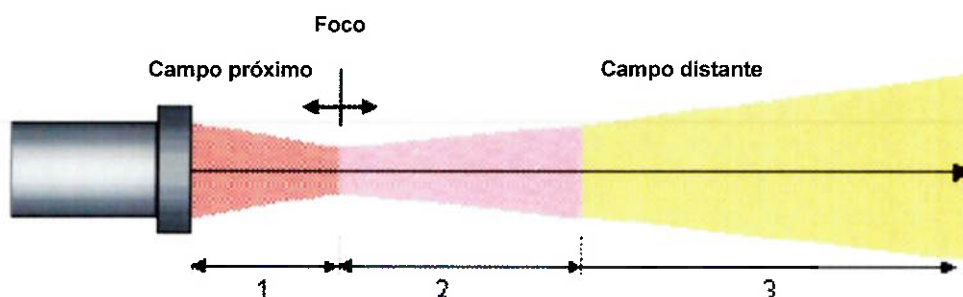


Figura 2.28 – Feixe sônico.
Fonte: ANDREUCCI, R. [34], p. 16.

2.6.2.4.3 Cabeçotes ou transdutores

Os cabeçotes são os acessórios do aparelho do ensaio de ultrassom responsáveis pela introdução e recebimento dos feixes sônicos nos materiais inspecionados, desde que intermediados por um líquido acoplante para a eliminação de qualquer possibilidade de interface com o ar. Os cabeçotes, ou transdutores, contém o cristal gerador de ondas em determinada frequência, o bloco amortecedor, para absorção das ondas refletidas da interface cabeçote/peça, os conectores elétricos, que fazem a conexão entre o cristal e o aparelho e uma carcaça protetora para todo o conjunto.

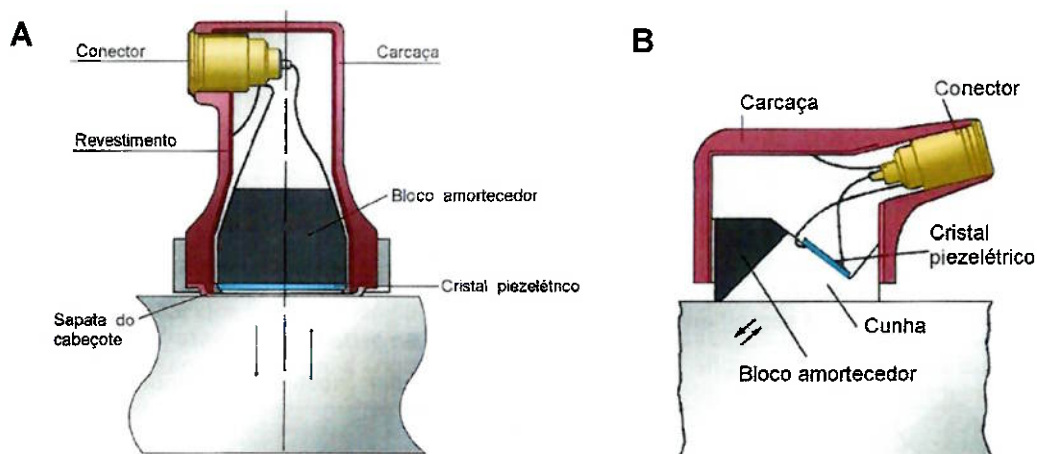


Figura 2.29 – Cabeçote normal (A) e angular (B).

Fonte: SANTIN, J. [31], p. 55 e p. 57.

Os cabeçotes mais utilizados nas inspeções por ultrassom são os denominados normais, que emitem ondas longitudinais, e os denominados angulares, que emitem ondas transversais. Os cabeçotes normais são amplamente utilizados na inspeção de chapas, fundidos, forjados e de medição de espessura para controle de corrosão. Uma variação do cabeçote normal é o duplo-cristal, que também emite ondas longitudinais, porém contém em seu interior um cristal para emitir as ondas ultrassônicas e outro para recebê-las, diminuindo a área de campo

próximo do feixe sônico. Já os cabeçotes angulares são utilizados para as inspeções em juntas soldadas, através da emissão do feixe sônico em ângulos pré-determinados, sendo os mais utilizados os cabeçotes com ângulos de 45°, 60° e 70°.

Para as inspeções de juntas soldadas em espessuras reduzidas, é recomendável o uso do cabeçote de 70°, que possui uma incidência mais inclinada do feixe sônico em relação à espessura da peça. Quanto menor a espessura ensaiada, maiores serão as reflexões do feixe sônico no interior da peça, trazendo uma maior dificuldade de inspeção e de reconhecimento de descontinuidades na tela do aparelho.

2.6.2.4.4 Técnicas de Inspeção

Alguns dos métodos e técnicas mais utilizados de inspeção por ultrassom segundo ANDREUCCI, R. [34] e SANTIN, J. [31] são os métodos pulso-eco, por transparência e por ressonância. Já entre as técnicas mais empregadas, destacam-se as técnicas por contato ou imersão, manual ou automática. Neste trabalho, será focado o método pulso-eco, que vem a ser o mais aplicado no ultrassom convencional industrial.

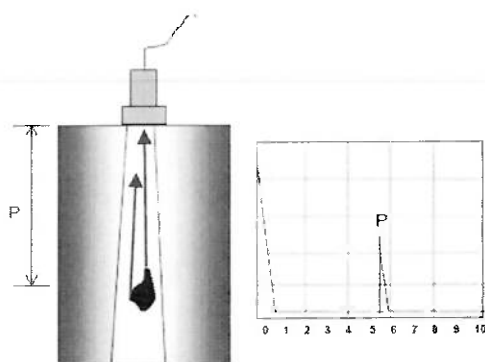


Figura 2.30 – Método pulso-eco.
Fonte: ANDREUCCI, R. [34], p. 31.

No método pulso-eco, apresentado na Figura acima, o cabeçote está separado da peça a ser ensaiada por uma película de acoplante, através da qual ele transmite para o interior da peça pulsos de energia sônica em intervalos de tempo determinados. Se os pulsos encontram uma superfície refletora, que pode ser uma descontinuidade ou o fundo da peça em exame, a energia refletida retorna ao cabeçote que a converte em um sinal na tela do aparelho.

2.6.2.4.5 Visualização de sinais

Os aparelhos de ultrassom são responsáveis por transformar os pulsos emitidos e transmitidos pelo transdutor em sinais em uma tela que possibilita a interpretação por parte do inspetor do que ocorre no interior da peça examinada. No ultrassom convencional existem basicamente três tipos possíveis de visualizações, além de telas que podem mostrar duas ou mais destas vistas.

A vista mais característica do ultrassom convencional é a tela A-Scan, que mostra um gráfico de amplitude (eixo vertical) x tempo percorrido pela onda (eixo horizontal). A partir desta imagem gráfica, é possível determinar mudanças no comportamento do eco quando há presença de descontinuidades, delimitá-las quanto ao seu tamanho e localização e calcular a sua profundidade. Atualmente, os aparelhos digitais de ultrassom convencional já executam os cálculos no momento da inspeção, disponibilizando na tela os valores necessários para a análise do inspetor.

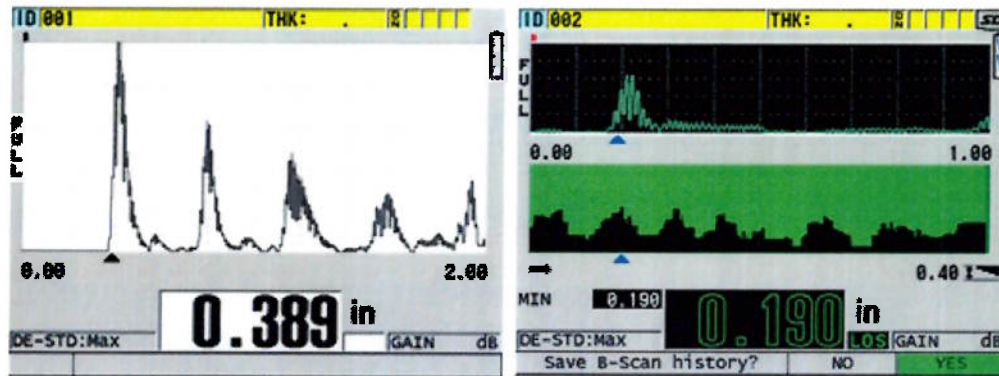


Figura 2.31 – Visualizações A-Scan e B-Scan.
Fonte: Olympus NDT [35].

A vista B-Scan, menos utilizada no ultrassom industrial, apresenta graficamente a seção transversal da peça, ou uma vista lateral, porém sem a medição da amplitude do eco. A tela C-Scan, por sua vez, mostra graficamente uma vista em planta da peça examinada, porém não apresenta sua profundidade.

2.6.2.4.6 Aferições e Calibrações

As imagens geradas pela tela do aparelho são em forma de gráficos que são gerados a partir de medições dos pulsos emitidos pelos transdutores, conforme já abordado. Porém, a localização destas imagens na tela não informa por si só a localização exata das discontinuidades, profundidade e tamanho, sendo necessária a calibração prévia da aparelhagem em medidas conhecidas para que estes valores sejam correspondentes à realidade e possam determinar com máxima precisão as indicações encontradas durante o ensaio.

As calibrações devem ser realizadas em blocos padrão de mesmo material da peça inspecionada, pois a velocidade do som precisa ser equivalente entre ambos. Desta forma, é possível determinar a escala de tempo e o nível de amplitude de energia sônica que deverá ser utilizado, que dependerão diretamente da espessura e do material a ser inspecionado.

Além das calibrações, a aparelhagem de ultrassom também precisa passar por verificações periódicas, que podem ser entendidas como conferências nas medidas padrões dos blocos e no funcionamento do aparelho e dos transdutores, para que assim seja garantido que a aparelhagem utilizada na inspeção esteja sempre em condições confiáveis de execução do ensaio.

2.6.2.4.7 Etapas de realização do ensaio

Em resumo, as principais etapas do ensaio de ultrassom convencional podem ser descritas a seguir:

Preparação superficial: Etapa inicial onde devem ser eliminadas quaisquer irregularidades que possam impedir o deslizamento do cabeçote sobre a superfície de ensaio.

Calibração da aparelhagem: Etapa onde o aparelho deve ser calibrado com a utilização de um em bloco padrão com a escala e velocidade do som a serem utilizadas.

Calibração da sensibilidade: Nesta etapa uma curva de referência deve ser construída, com base em blocos de referência com superfícies refletoras conhecidas.

Varredura com cabeçote normal: A inspeção deve ser iniciada com o cabeçote normal, com a varredura de toda a superfície da chapa.

Varredura com cabeçote angular: No caso de superfícies soldadas, chapas ou tubos, deve ser realizada a varredura do cordão de solda através dos cabeçotes angulares.

Demarcação de descontinuidades na peça: Caso seja encontrada alguma indicação de descontinuidade na tela do aparelho, esta deve ser dimensionada e mapeada na peça de acordo um ponto de referência existente na peça.

Laudo: Após o ensaio, deverá ser emitido o relatório com o laudo do inspetor. O mapeamento realizado na peça deve ser transferido para o relatório, em caso de ensaio reprovado.



Figura 2.32 – Execução do ensaio por ultrassom convencional
Fonte: Arquivo Poliend.

3 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é demonstrar a eficácia da inspeção do ensaio por ultrassom convencional em juntas de topo soldadas em materiais duplex UNS S32205 fundido com característica austenítica, na detecção interna das descontinuidades provenientes do processo de soldagem TIG: falta de fusão, falta de penetração, trinca e porosidade. Evidenciando sensibilidade igual ou maior ao ensaio radiográfico e fornecendo credibilidade ao sistema de inspeção desta técnica.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para possibilitar a análise do estudo da eficácia do ensaio por ultrassom convencional em juntas soldadas de característica austeno-ferrítico (duplex UNS S32205), proporcionar credibilidade na inspeção de produtos e equipamentos, foram utilizados quatro corpos de provas com características físicas próximas e com inserção intencional de tipos de descontinuidades distintas (falta de fusão, falta de penetração, porosidade e trincas) provenientes do processo de soldagem adotado.

Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios não destrutivos superficiais por líquido penetrante e partículas magnéticas, além de radiografia e ultrassom convencional, visando estabelecer um parâmetro comparativo na detectabilidade entre ambos os ensaios volumétricos e evidenciar a eficácia do ensaio por ultrassom convencional em materiais com características austeno-ferrítico.

Desta forma, foi utilizado um lingote usinado com dimensão de 150 mm x 100 mm de diâmetro que foi inspecionado com as técnicas de ensaio por líquido penetrante antes da configuração final da chapa teste, ensaio por partículas magnéticas na superfície radial e axial do lingote e ensaio por ultrassom convencional com uso de transdutores monocristal de onda longitudinal para verificar a ausência de descontinuidades volumétricas no metal base.

Após usinagem e extração das chapas teste, foi realizada a soldagem nas mesmas e submetidas aos ensaios radiográfico e ultrassom convencional nos quatro corpos de prova com espessura de 16mm, conforme detalhado no desenvolvimento deste capítulo.

4.1 Materiais

Uma das questões a ser abordada quando se deseja demonstrar a eficácia do ensaio em questão, é a simulação do mesmo nas condições reais do processo de fabricação e desenvolvimento de um equipamento em condição fabril. Desta forma, foi produzido com o processo de fundição um lingote cilíndrico com as mesmas características químicas do produto laminado, atendendo aos limites estipulados pela classificação comercial ao aço inoxidável duplex UNS S32205.

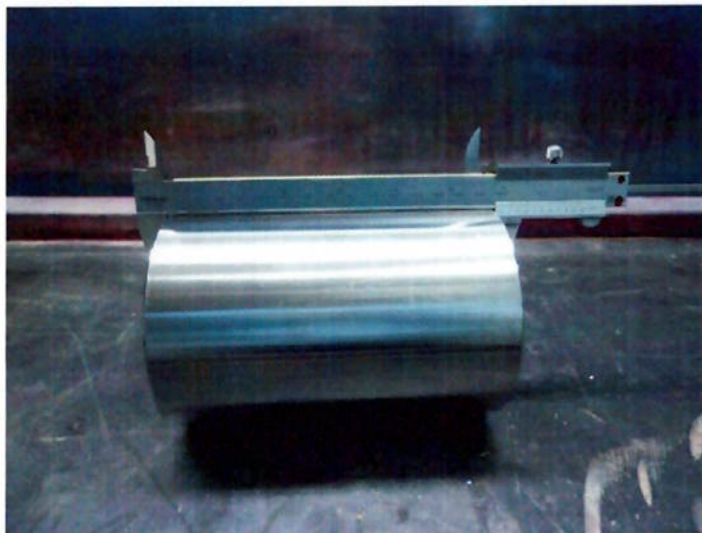


Figura 4.1 – Lingote fundido e usinado

Tabela 4.1 – Composição química do lingote

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	N%
0,017	0,78	0,90	0,023	0,003	21,7	5,86	2,66	0,10

Para possibilitar a elaboração dos corpos de prova, foi fundamental a extração no sentido radial de 05 discos com espessuras de 16mm ao longo do lingote, permitindo a usinagem nas características necessárias para preparação das juntas a serem soldadas com o processo de soldagem TIG.

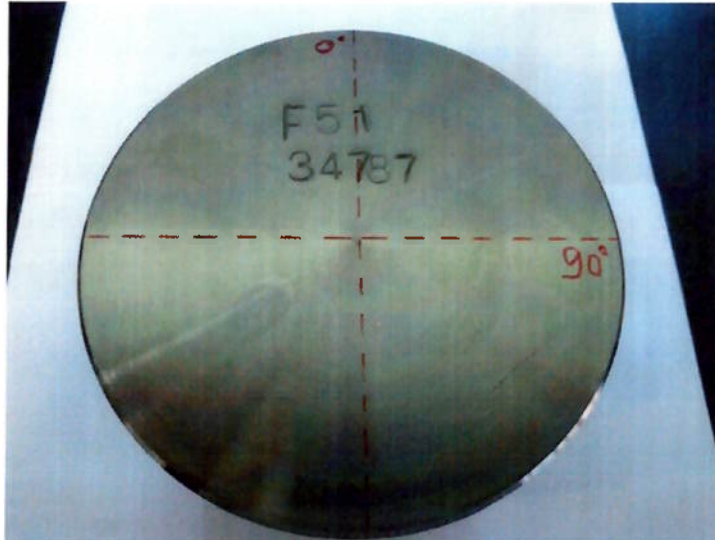


Figura 4.2 – Extração do disco para preparação da junta

As chapas usinadas foram configuradas fisicamente para atender aos requisitos da boa prática de soldagem, dentre eles a configuração do chanfro e a possibilidade de abertura da raiz da soldagem realizada.

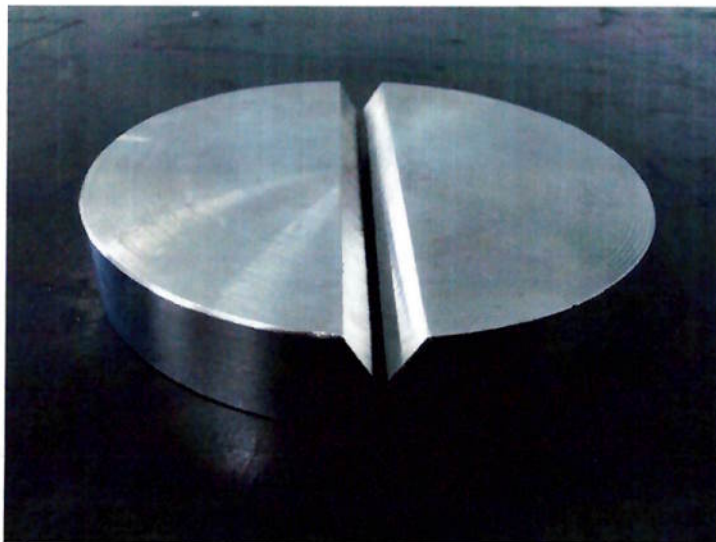


Figura 4.3 – Preparação da junta para soldagem

Dentre os corpos de prova, 04 unidades foram destinadas para a inserção das descontinuidades provenientes do processo de soldagem adotado e 01 unidade foi direcionada para elaboração do bloco de sensibilidade e aferição de todo

conjunto de aparelhagem conforme especificado pela norma ASME V Seção VIII Divisão 1 Edição 2010.

Os corpos de prova foram identificados em ordem numérica e por característica de descontinuidade inserida, exceto o bloco de aferição que foi mantido isento de descontinuidades:

Tabela 4.2 – Identificação dos corpos de prova

<i>Identificação do corpo de prova</i>	<i>Tipo de descontinuidade</i>
<i>CP-USP – 01</i>	Falta de fusão
<i>CP-USP – 02</i>	Falta de penetração
<i>CP-USP – 03</i>	Porosidade
<i>CP-USP – 04</i>	Bloco de aferição
<i>CP-USP – 05</i>	Trinca



Figura 4.4 – Identificação dos corpos de prova

No intuito de demonstrar a eficácia do ensaio por ultrassom nas condições propostas, sugeriu-se a utilização dos transdutores convencionais conforme tabela 4.3 abaixo:

Tabela 4.3 – Característica dos transdutores

<i>Descrição</i>	<i>Tipo</i>	<i>Frequência</i>	<i>Ângulo</i>	<i>Dimensão</i>
MSEB4H	Duplo cristal	4Mhz	0°	Ø13mm
B2SN	Monocristal	2Mhz	0°	Ø25mm
MB4S	Monocristal	4Mhz	0°	Ø16mm
VSY	Duplo cristal	4Mhz	45°	8 x 10mm
VSY	Duplo cristal	4Mhz	60°	8 x 10mm



Figura 4.5 – Transdutores ultrassônicos

O aparelho de ultrassom convencional utilizado no desenvolvimento do presente trabalho foi da marca GE, denominado comercialmente como XS Phasor.

4.2 Métodos

Para atingir os objetivos do trabalho, os corpos de prova apresentados foram submetidos a diversos ensaios durante o processo de execução do trabalho, inclusive a matéria prima em forma de lingote após usinagem, que serão descritos ao longo deste capítulo.

Os corpos de prova foram produzidos e enviados diretamente para a execução da radiografia, em local terceirizado, bem como a micrografia do cubo utilizado para análise da atenuação sônica no referido material antes da soldagem dos demais corpos de prova. Os ensaios superficiais de líquido penetrante e partículas magnéticas foram executados para verificar a integridade superficial das soldagens após remoção do reforço e evitar possíveis interferências na presença de descontinuidades para avaliações dos ensaios volumétricos.

Os laudos referentes ao ensaio radiográfico, macrografias e micrografias dos corpos de prova foram realizados em empresas terceirizadas, bem como os resultados gerados pela inspeção de ultrassom convencional que constam no Anexo A e são apresentados e discutidos no próximo capítulo. As evidências dos procedimentos utilizados para a realização dos ensaios constam no Anexo B que é apresentado no final deste trabalho. Todos os equipamentos e blocos de referência utilizados estavam dentro do período de validade das calibrações, assim como os produtos utilizados estavam dentro dos prazos de validade fornecidos pelos fabricantes.

O processo de realização dos ensaios foi executado nas mesmas etapas nos corpos de prova examinados, e é apresentado conforme sequência de execução detalhado a seguir.

O ensaio de líquido penetrante foi executado com base no procedimento POLIEND LP-01 Rev. 08, por inspetor qualificado sendo executado sob as condições ideais de temperatura e iluminação estabelecidas no procedimento citado.

O ensaio foi iniciado no lingote fundido em superfície usinada, antes da extração dos discos que proporcionaram a configuração da junta para soldagem, pois esta operação visava verificar possíveis descontinuidades provenientes do

processo de fabricação do lingote, conforme já mencionado na revisão bibliográfica deste trabalho.

Após aguardar o tempo de penetração de 15 minutos conforme especificado no procedimento utilizado, o excesso de líquido penetrante foi removido por pulverização de água com pressão e temperatura controlada. Para a remoção do excesso de penetrante foi aguardado o tempo de secagem para em seguida iniciar a etapa de revelação. Nesta etapa, após aplicado o revelador por pulverização, foi iniciado o laudo imediatamente, finalizando-o após 20 minutos.

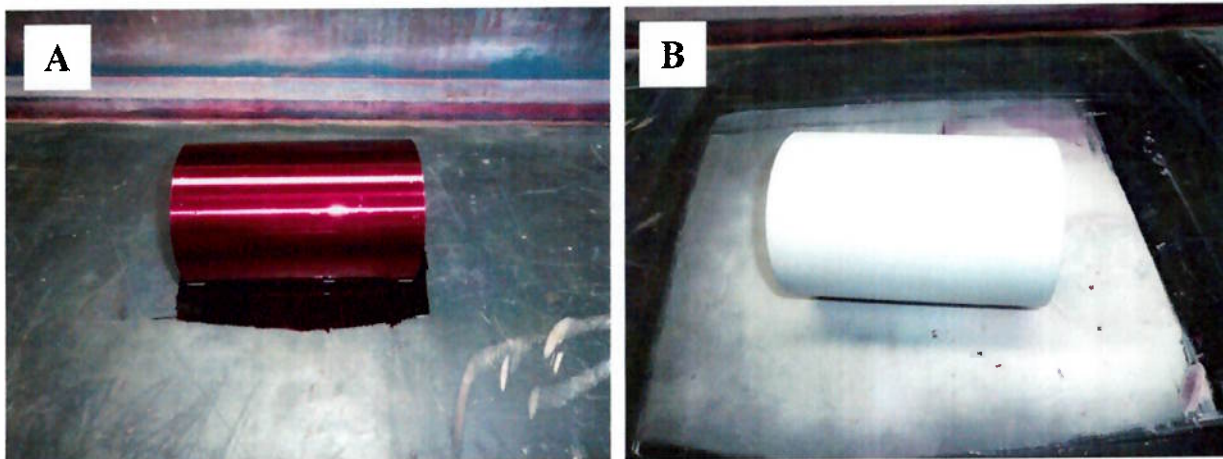


Figura 4.6 – Ensaio em lingote usinado
A) Tempo de penetração B) Revelação final

Finalizado o ensaio superficial por capilaridade no lingote, sugeriu-se a realização do ensaio magnético por inserção de fluxo através de ponteiras articuladas na superfície do mesmo pela técnica longitudinal via úmida fluorescente, na qual foi evidenciada a sensibilidade na identificação da microestrutura magnetizante que compõe o material, conforme pode ser visto na figura 4.7.

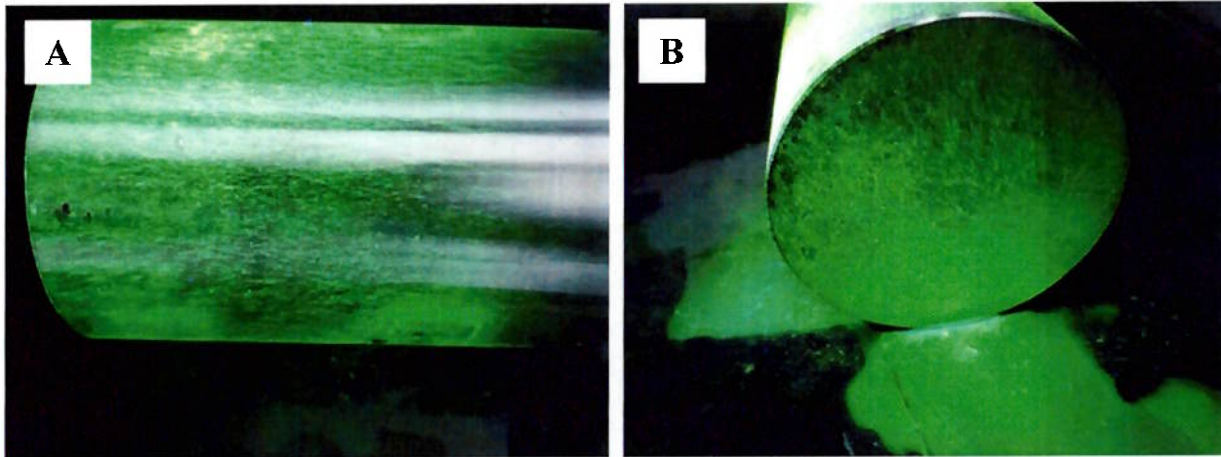


Figura 4.7 – Ensaio em lingote usinado – Partículas magnéticas fluorescente
A) Superfície longitudinal B) Superfície axial

Concluída a análise superficial do lingote através das técnicas superficiais apresentadas, houve a necessidade de verificação volumétrica do produto usinado através do ensaio por ultrassom com uso de transdutores normais de ondas longitudinais de diferentes diâmetros e frequências, sendo posicionados em direções ortogonais ao eixo do lingote pela superfície radial e acoplamento dos transdutores na direção axial, proporcionando a detecção de qualquer descontinuidade posicionada ao longo do volume inspecionado.

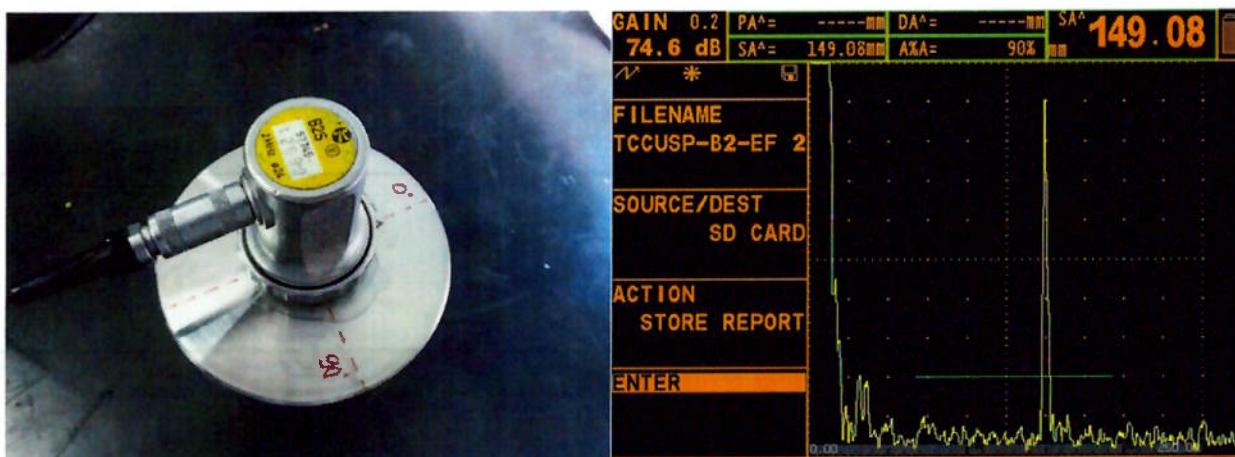


Figura 4.8 – Inspeção por ultrassom
Uso de transdutor normal com frequência de 2Mhz no sentido axial do lingote

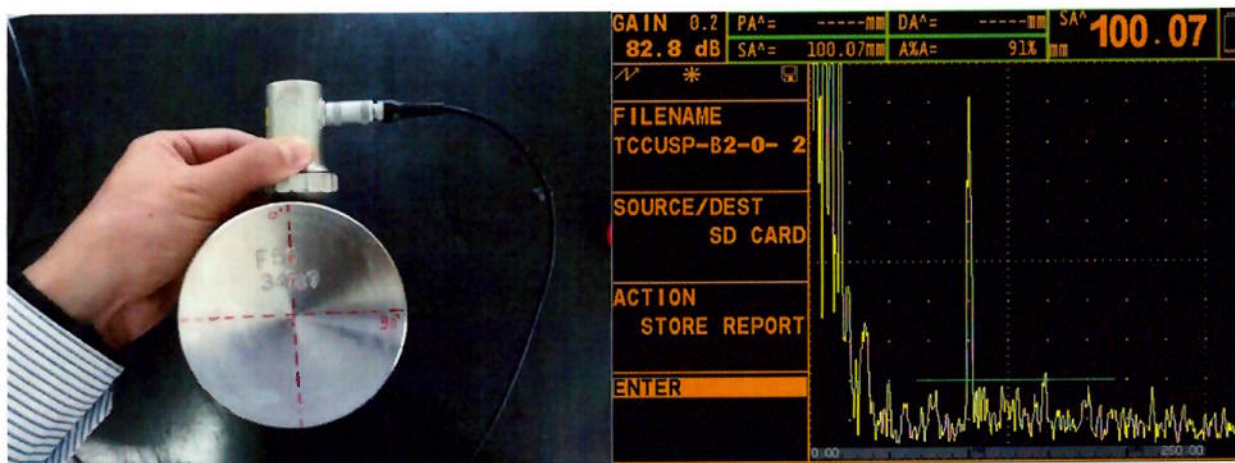


Figura 4.9 – Inspeção por ultrassom
Uso de transdutor normal com frequência de 2Mhz no sentido radial do lingote

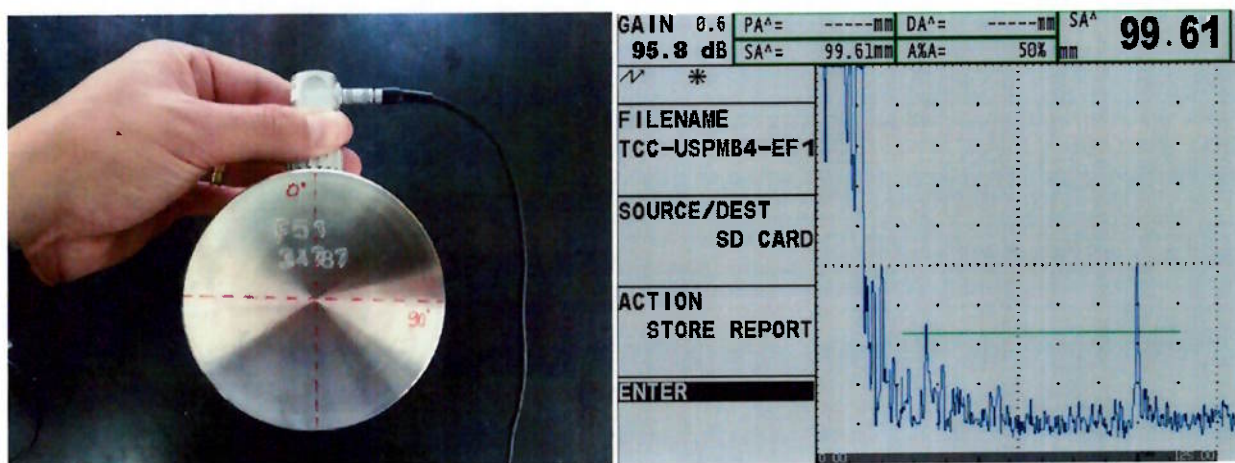


Figura 4.10 – Inspeção por ultrassom
Uso de transdutor normal com frequência de 4Mhz no sentido radial do lingote

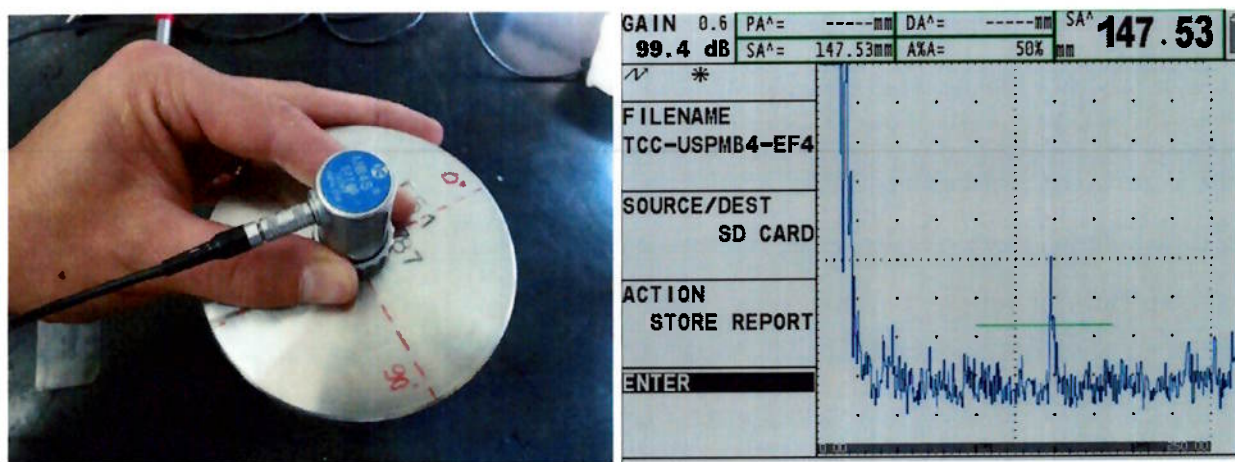


Figura 4.11 – Inspeção por ultrassom
Uso de transdutor normal com frequência de 4Mhz no sentido axial do lingote

Além das verificações no metal de base já apresentadas, sugeriu-se a possibilidade de execução da metodologia de controle da atenuação sônica no material duplex nas direções ortogonais da amostra quadrada extraída do núcleo do duplex antes da extração dos discos, nas quais foram identificadas como direções X, Y e Z na Figura 4.12. Para efeito de controle real da atenuação, o bloco apresenta dimensões iguais em suas direções 25mm X 25mm x 25mm, proporcionando percursos sônicos na mesmas condições de análise e condições de acoplamento.

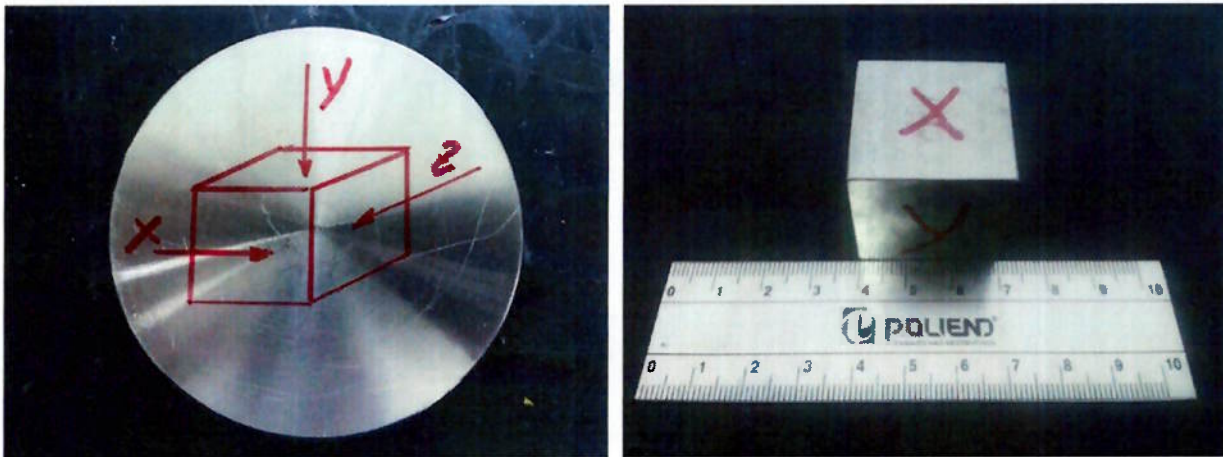


Figura 4.12 – Extração do bloco quadrado para análise comparativa da atenuação sônica nas direções X, Y e Z

Pela característica física do bloco quadrado, somente foi possível a realização da análise com uso do transdutor MSEB4H, pela limitação apresentada por outros transdutores na presença da chamada “Zona Morta” do feixe sônico, característica específica para cada tipo de transdutor que limita a detecção de qualquer refletor na referida zona pela intensidade da transformação da energia elétrica em energia mecânica (vibração do cristal pelo efeito piezoelétrico), sendo os resultados apresentados no próximo capítulo.



Figura 4.13 – Acoplamento do transdutor MSEB4H nas direções X, Y e Z para análise da atenuação sônica.

Para entendimento das análises referente às condições de atenuação sônica no material duplex UNS S32205 com uso de transdutor duplo cristal de ângulo reto, foi realizado por empresa terceirizada a micrografia dos blocos das regiões X, Y e Z, apresentando as características e condições físicas das constituintes do material como segue nas figuras: 4.14, 4.15 e 4.16.

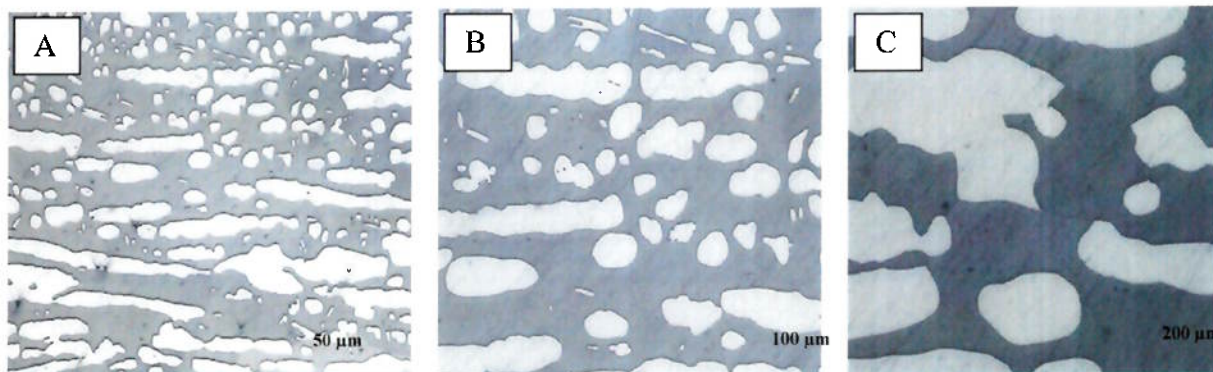


Figura 4.14 – Imagens micrográficas do duplex UNS S32205 na face X do bloco.
A) Face X com 50x de aumento. B) Face X com 100x de aumento. C) Face X com 200x de aumento.

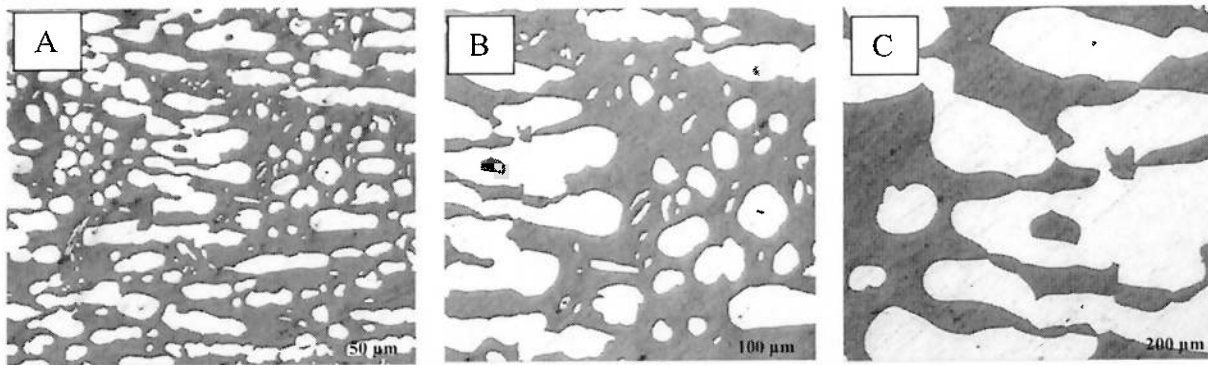


Figura 4.15 – Imagens micrográficas do duplex UNS S32205 na face Y do bloco.
A) Face Y com 50x de aumento. B) Face Y com 100x de aumento. C) Face Y com 200x de aumento.

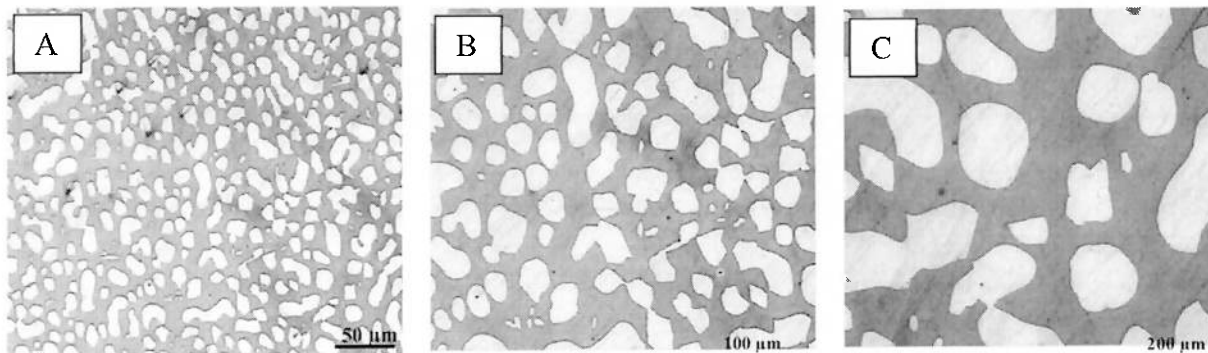


Figura 4.16 – Imagens micrográficas do duplex UNS S32205 na face Z do bloco.
A) Face Z com 50x de aumento. B) Face Z com 100x de aumento. C) Face Z com 200x de aumento.

No intuito de proporcionar condições para soldagem no material em estudo, foi realizado por processo de usinagem a configuração da chapa em forma de disco após as análises dos ensaios prévios já realizados.

Os discos foram segmentados no sentido axial do lingote proporcionando duas partes iguais, originando chapas de mesmas dimensões físicas, inclusive com as espessuras (16mm) apresentadas no propósito deste trabalho.



Figura 4.17 – Extração dos discos no corpo do lingote e usinagem dos chanfros para realização da soldagem.

As características da configuração física das chapas preparadas para soldagem não foram submetidas ao controle normativo, sendo proporcionadas de maneira aleatória pela experiência do operador do centro de usinagem e pelas informações fornecidas previamente pelo autor deste trabalho.

De posse da junta preparada, a soldagem foi conduzida por operador qualificado no referido processo, mantendo as necessidades de introduzir as descontinuidades necessárias (falta de fusão, falta de penetração, porosidade e trinca) para o propósito das análises.



Figura 4.18 – Preparação das juntas e execução da soldagem

Pela característica do tipo de inspeção proposto e transdutores utilizados, houve a necessidade de remoção de todo o reforço da solda (acabamento), proporcionando o deslocamento dos transdutores sob toda a área da zona fundida, limitação necessária para atender as condições físicas do limite de incidência do feixe sônico dos transdutores GE VSY, por não possibilitar reflexões na incidência indireta e permitir a análise em feixe único. Tais limitações e características dos transdutores não serão aqui estudados por não serem objeto deste trabalho.

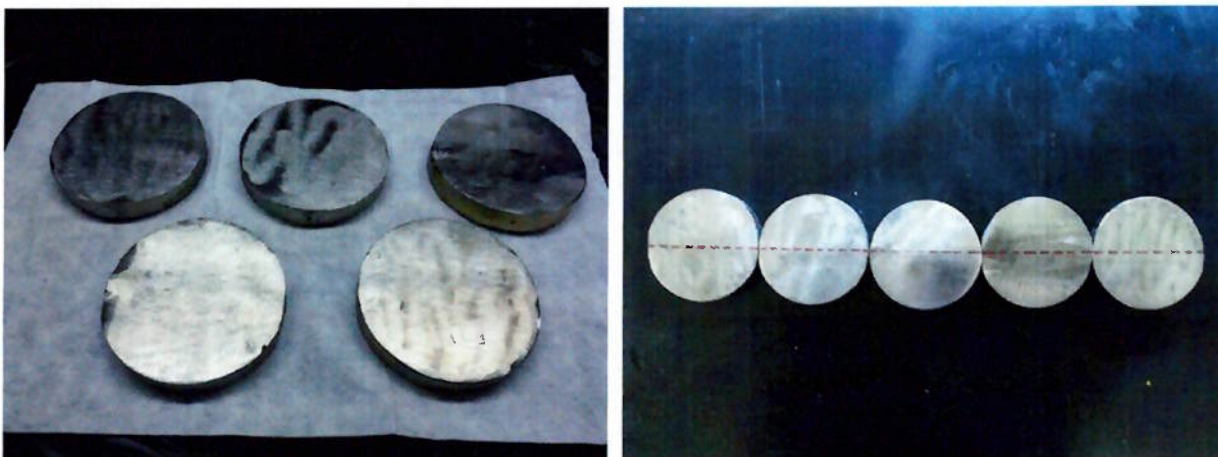


Figura 4.19 – Corpos de prova com reforços de solda removidos

Os corpos de prova foram produzidos e enviados diretamente para a execução da radiografia em local terceirizado, não sendo possível o registro e acompanhamento das etapas desenvolvidas. Os ensaios superficiais de líquido penetrante e partículas magnéticas foram executados para verificar a integridade superficial dos corpos de prova e evitar possíveis interferências de descontinuidades superficiais nas avaliações dos ensaios volumétricos (ultrassom e radiografia). Os relatórios emitidos encontram-se no Anexo A.

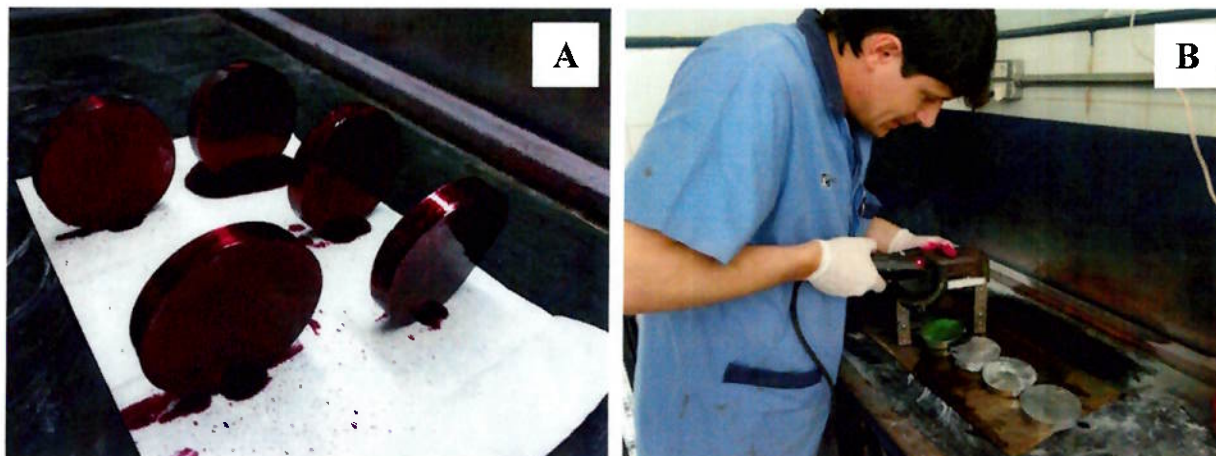


Figura 4.20 – Ensaio nos corpos de prova soldados
A) Ensaio por líquido penetrante colorido B) Ensaio por partículas magnéticas fluorescente.

Para realização do ensaio por ultrassom convencional, houve a necessidade de elaboração do bloco de calibração isento de descontinuidades e nas mesmas características físicas e metalúrgicas das demais juntas soldadas, proporcionando a simulação da inspeção em furos cilíndricos de diferentes profundidades, e simultaneamente a calibração da sensibilidade para realização do ensaio, garantindo a eficiência da incidência sônica e controle da atenuação na zona fundida. Tal bloco atende aos requisitos Normativos da Asme V Seção VIII Divisão 1 Ed. 2010, na inserção do diâmetro de 2,5mm do furo cilíndrico nas profundidades de $\frac{1}{3} T$, $\frac{1}{2} T$ e $\frac{3}{4} T$, onde T é a espessura da junta soldada.

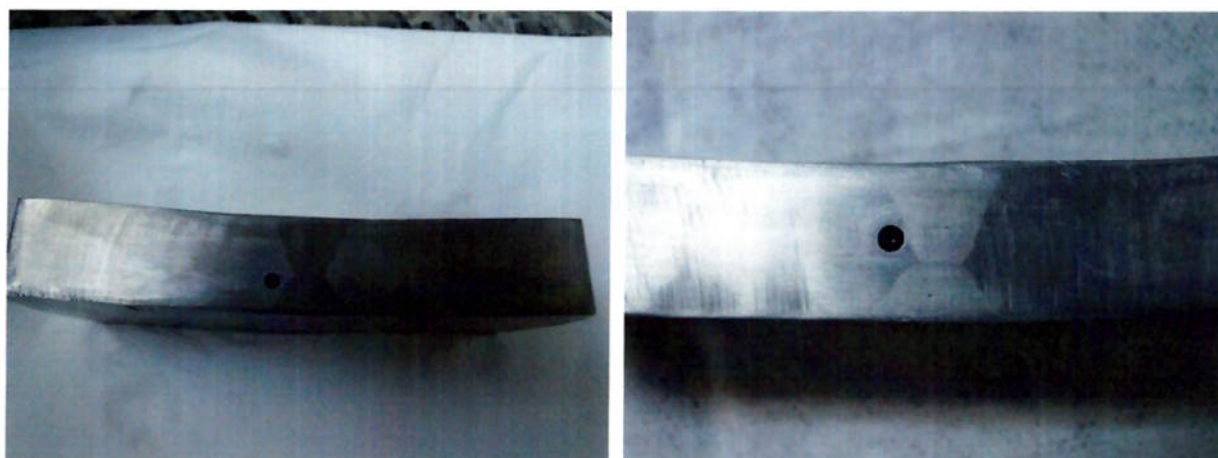


Figura 4.21 – Bloco de calibração para inspeção com transdutor angular conforme ASME V Seção VIII Divisão 1 Ed. 2010.

Finalizada a etapa de calibração do conjunto aparelho e acessórios iniciou-se a realização do ensaio por ultrassom convencional nos corpos de prova CP-USP – 01, CP-USP – 02, CP-USP – 03 e CP-USP – 05, sendo os relatórios com os laudos das inspeções e as imagens da ecodinâmica provenientes das descontinuidades encontradas, dispostos no Anexo A deste trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos experimentos realizados em todas as etapas da matéria prima do fundido, o ensaio por líquido penetrante executado na etapa inicial de análise do lingote não apresentou indicações de descontinuidades que pudessem interferir nos respectivos ensaios posteriores.



Figura 5.1 – Resultado do ensaio por líquido penetrante no lingote usinado
Isento de descontinuidades

Na sequência, a realização do ensaio de indução magnética pelo método fluorescente também não apresentou indicações de descontinuidades superficiais e sub-superficiais que poderiam descaracterizar a utilização do lingote nas etapas de preparação para soldagem, bem como a progressão de possíveis descontinuidades durante a execução da mesma. Contudo, pode-se perceber nitidamente a visualização da indicação fluorescente da constituinte magnetizante do referido material, quando induzido o campo magnético na superfície do lingote conforme pode ser visto na figura 5.2.

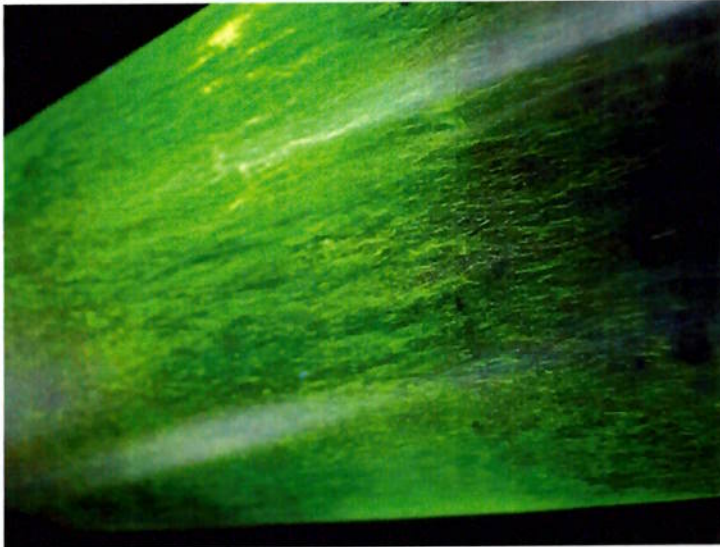


Figura 5.2 – Resultado do ensaio por partículas magnéticas no lingote usinado

Tal resultado demonstra a condição de êxito na execução do ensaio por partículas magnéticas em material duplex UNS S32205 quando executados em estado de matéria prima em condição de superfície usinada.

Na análise volumétrica do lingote através do ensaio por ultrassom convencional, foi possível evidenciar a ausência de indicações de descontinuidades volumétricas provenientes do processo de fabricação, bem como a possibilidade de inserção do feixe sônico de ângulo reto em diferentes frequências e direções de acoplamento dos transdutores, como apresentado nas figuras 5.3 a 5.6.

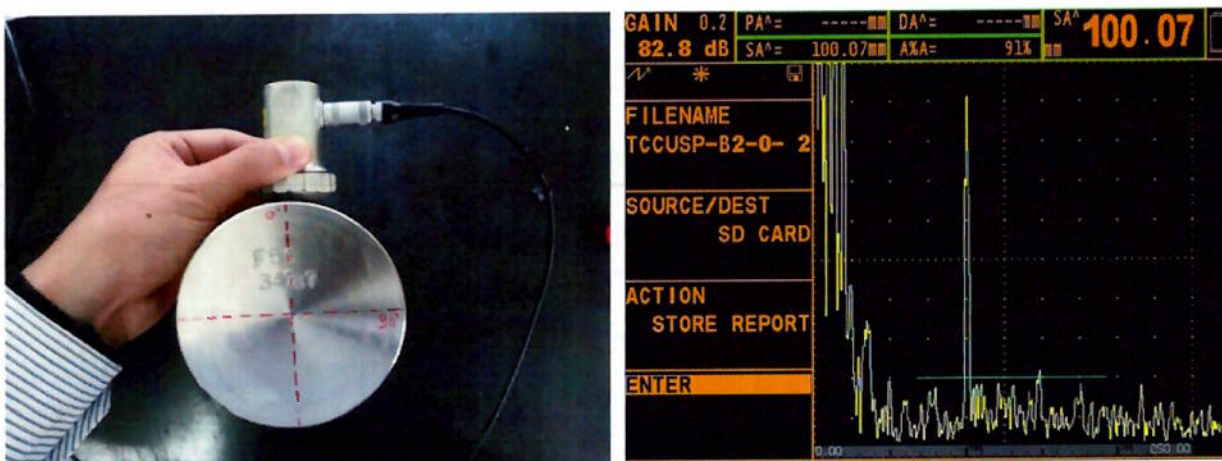


Figura 5.3 – Acoplamento do transdutor B2SN no sentido radial do lingote

Na figura 5.3 nota-se a propagação natural do feixe sônico por toda espessura do corpo cilíndrico no sentido radial com uso de transdutor B2SN com

frequência de 2Mhz, com intensidade sônica de 82.8 decibéis para um percurso sônico de 100,07mm a 91% de amplitude da tela do osciloscópio. A amplitude apresentada torna-se referência para análise da atenuação sônica para transdutores de menores frequências como pode ser observado nas figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 a diante.

Por outro lado, a execução do ensaio pela superfície axial do lingote com uso do mesmo transdutor possibilitou analisar outro cenário que referencia a condição da atenuação no material, pois mesmo para um percurso sônico de maior projeção (149,08mm) foi necessário menos quantidade de decibéis (74,6 dB) para a amplitude de 90% da tela do osciloscópio, como pode ser evidenciado na figura 5.4.



Figura 5.4 – Acoplamento do transdutor B2SN no sentido axial do lingote

Com o uso do transdutor de frequência de 4 Mhz denominado MB4S foi possível verificar que a frequência influencia significativamente na atenuação sônica do material UNS S32205 para a espessura de 100mm, pois necessita de 95,8 decibéis para posicionamento da indicação da espessura radial a 50% de amplitude no osciloscópio, conforme figura 5.5. Além de evidenciar o acréscimo da atenuação sônica quando comparado a figura 5.3. Na figura 5.4 é possível perceber a presença do alto índice de ruído provocado pela característica metalúrgica do material, algo que prejudica a inspeção quando se deseja a detectabilidade de descontinuidades em regiões próximas a superfície, originando uma “zona morta” da inspeção, além da dificuldade de detecção de pequenos refletores.

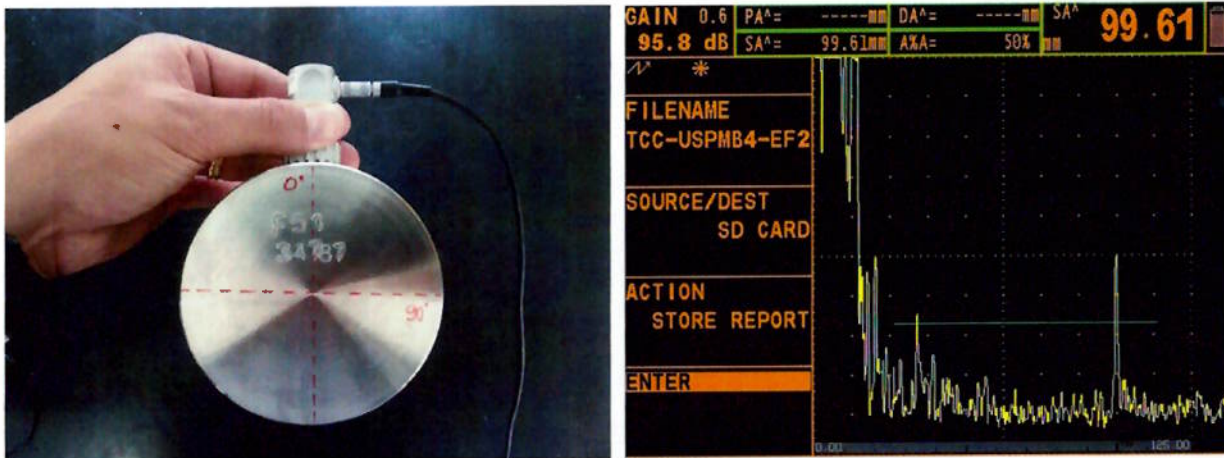


Figura 5.5 – Acoplamento do transdutor MB4S no sentido radial do lingote

Na figura 5.6 percebe-se o elevado índice de ruído provocado pelo acréscimo de energia sônica (99,4 decibéis) com uso do transdutor de 4Mhz para posicionamento da indicação da espessura axial (150mm) a 50% da tela do osciloscópio, tornando impossível qualquer inspeção desta característica quando se deseja detectar pequenos refletores, além de não proporcionar confiabilidade medida exata do percurso sônico.



Figura 5.6 – Acoplamento do transdutor B2SN no sentido axial do lingote

A condição das diferenças da atenuação sônica apresentada nas figuras 5.3 e 5.4 não significa que a característica granular do material seja o responsável pelo resultado encontrado, pois foi realizada a análise da atenuação do respectivo material através da verificação em diferentes direções de incidência, como apresentado nas figuras 4.13.

A análise da atenuação sônica nos blocos quadrados, conforme apresentado na figura 4.13, foi realizada com uso do transdutor duplo cristal de onda longitudinal com frequência de 4Mhz denominado MSEB4H. Tal condição evidencia que o acoplamento do transdutor duplo cristal nas posições X, Y e Z possibilita o posicionamento da indicação do percurso sônico de 30mm em amplitude aproximada de 80% do osciloscópio com a mesma intensidade de energia sônica, ou seja, 38,2 decibeis para as superfícies X,Y e Z como segue na figura 5.7.

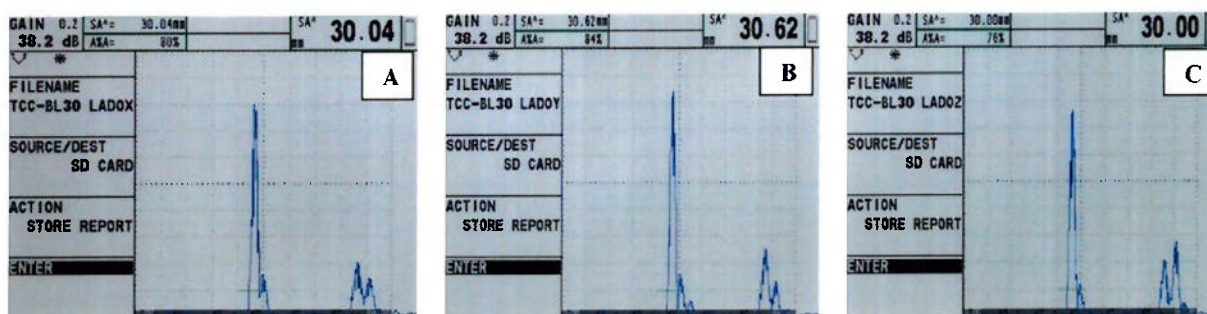


Figura 5.7 – Ecodinâmica da atenuação sônica no bloco quadrado de 30mm com uso de transdutor duplo cristal nas faces X, Y e Z
A) Face X a 80% de amplitude. B) Face Y a 84% de amplitude. C) Face Z a 76% de amplitude.

Mesmo com as diferenças de amplitudes apresentadas na figura 5.7, o fator preponderante para justificar as diferenças entre o acoplamento do transdutor nas superfícies radial e axial é a deficiência de acoplamento da sapata do transdutor na superfície radial do corpo cilíndrico, pois o diâmetro de 25mm do transdutor não possibilita o perfeito acoplamento requerido para a condição ideal de inserção do feixe sônico, havendo perda de energia sônica na incidência da superfície. Além desta análise, foi realizada a micrografia das faces X, Y e Z do bloco correspondente conforme as figuras 4.14, 4.15 e 4.16 não apresentando alterações metalúrgicas em suas constituintes que justifique a absorção sônica correspondente a atenuação analisada.

A partir dos experimentos realizados nos corpos de prova, a análise dos laudos de ensaio radiográfico (RX) e ultrassom convencional (USPA) que constam no Anexo A deste trabalho, foram registrados os resultados apresentados na tabela 5.1.

Na tabela de resultados, todas as juntas ensaiadas tiveram seus laudos apresentados entre aprovadas (A) ou reprovadas (R), sendo que, quando reprovadas, foram identificados os tipos de discontinuidades e defeitos encontrados

pelo ensaio em questão. Nos experimentos realizados nos corpos de prova, os defeitos encontrados foram poros (PO), falta de fusão (FF), trinca (TR) e falta de penetração (FP).

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios nos corpos de prova

Corpo de prova	ENSAIO RADIOGRÁFICO		ULTRASSOM CONVENCIONAL	
	LAUDO	TIPO DE DEFEITO	LAUDO	TIPO DE DEFEITO
CP-USP-01	R	PO/FF	R	FF
CP-USP-02	R	PO	R	FP
CP-USP-03	R	PO/FF	R	PO
CP-USP-04	A	-	A	-
CP-USP-05	A	-	R	TR

Legenda:

PO = Porosidade / FF = Falta de Fusão / FP = Falta de Penetração / TR = Trinca / A = Aprovado / R = Reprovado

Numa análise geral, pode-se observar que o ultrassom convencional proporcionou a detectabilidade de um número maior de defeitos quando comparados ao ensaio radiográfico, principalmente na manutenção da terminologia dos tipos de defeitos inseridos propositalmente nos corpos de prova.

No corpo de prova denominado como CP-USP-01, foi inserido durante o processo de soldagem descontinuidades caracterizadas como falta de fusão (FF), sendo evidenciado no relatório radiográfico sua detectabilidade, bem como a detecção no ensaio por ultrassom convencional com uso de transdutor angular de onda longitudinal conforme já mencionado na revisão bibliográfica.

A figura 5.8 demonstra a detecção por ultrassom convencional da falta de fusão inserida no CP-USP-01, sendo que sua detectabilidade foi proporcionada pela detecção dos transdutores angulares e duplo cristal, mantendo a confiabilidade nos transdutores para o tipo de refletor específico.

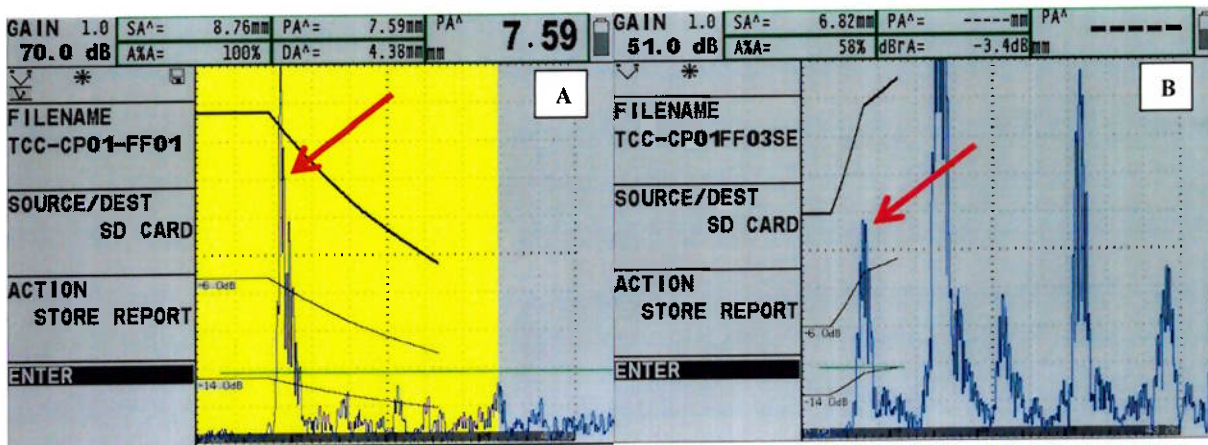


Figura 5.8 – Ecodinâmica da falta de fusão no corpo de prova CP-USP-01
 A) Ecodinâmica da falta de fusão com transdutor angular B) Ecodinâmica da falta de fusão com transdutor duplo cristal MSEB4H

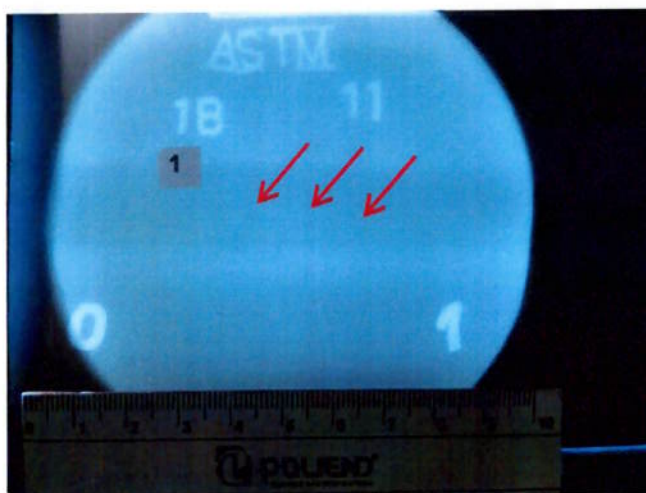


Figura 5.9 – Radiografias da junta CP-USP-01.
 A radiografia revela a presença de falta de fusão e porosidade na junta, indicadas pelas setas.

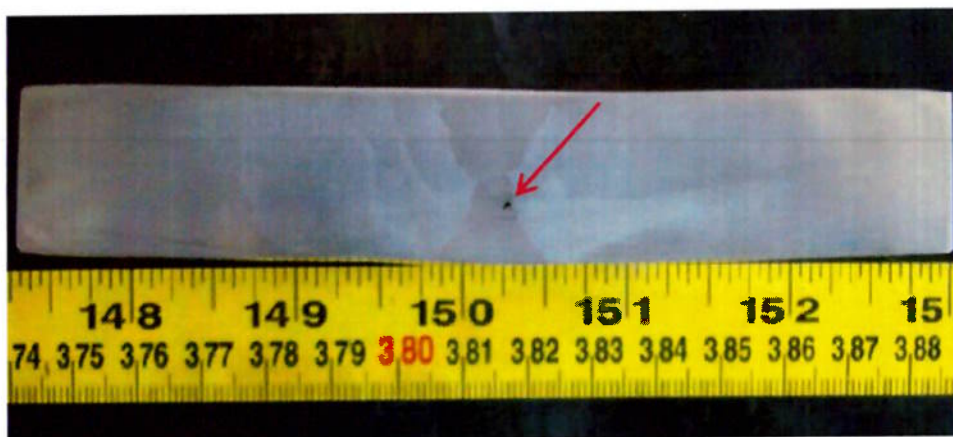


Figura 5.10 – Macrografia do CP-USP-01.
 A seta vermelha apresenta a presença da falta de fusão detectada no ensaio por ultrassom convencional e no ensaio radiográfico.

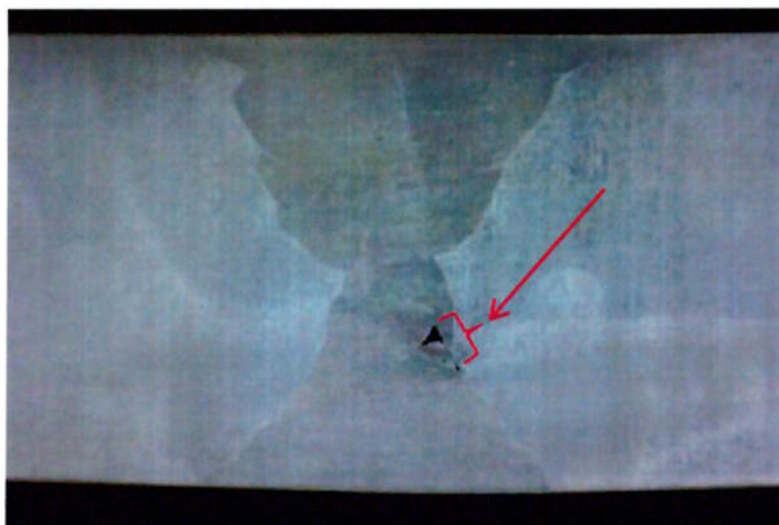


Figura 5.11 – Macrografia localizada do CP-USP-01.
A seta vermelha apresenta a altura da falta de fusão no sentido da espessura.

Nota-se que a falta de fusão apresenta uma amplitude física no perfil da junta soldada, não sendo possível acesso a tais detalhes quando detectados somente com o ensaio radiográfico. Por outro lado, o ensaio por ultrassom convencional fornece tais detalhes quando executados com características específicas para tais finalidades, não sendo de antemão o objetivo deste trabalho.

A partir desta primeira constatação, é possível afirmar que o ultrassom detectou o mesmo defeito apresentado na radiografia, porém com acesso a informações exatas de profundidade e localização no cordão de solda.

No corpo de prova CP-USP-02 foi inserido durante a soldagem uma falta de penetração (FP) no centro do cordão de solda conforme pode ser evidenciado sua detecção por ultrassom convencional na figura 5.12.

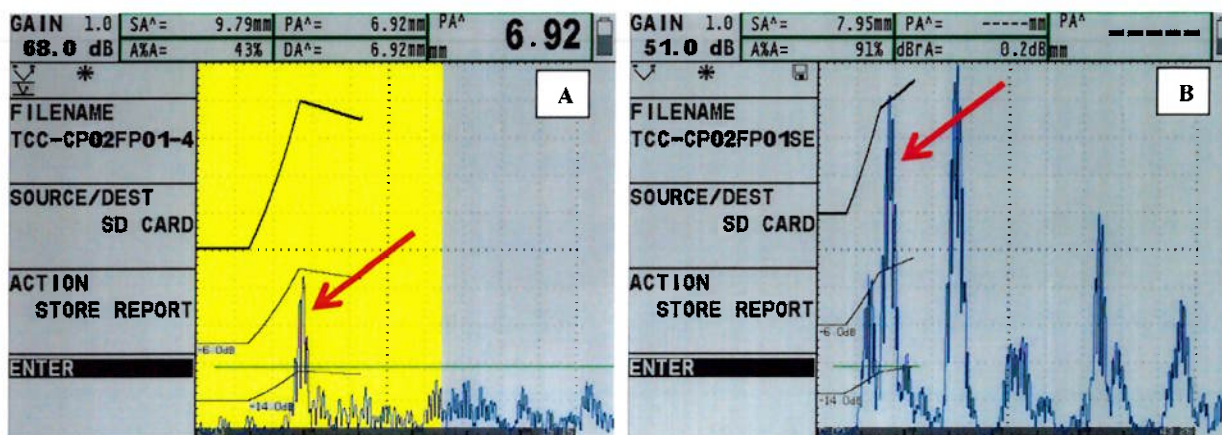


Figura 5.12 – Ecodinâmica da falta de penetração no corpo de prova CP-USP-02
A) Ecodinâmica da falta de penetração com transdutor angular B) Ecodinâmica da falta de penetração com transdutor duplo cristal MSEB4H

Mesmo proporcionando detectabilidade na inspeção por ultrassom com o uso do transdutor angular, a amplitude máxima da indicação da falta de penetração não ultrapassou a curva de referência denominada como DAC (Distance Amplitude Curve), condição que impossibilitaria a reprovação pela Norma ASME V Seção VIII Divisão 1 apêndice 12, por outro lado a inspeção com uso do transdutor duplo cristal apresentou refletividade acima de 100% da DAC, proporcionando a reprovação do defeito conforme Norma nas mesmas condições de laudo apresentadas no ensaio radiográfico.

Tal condição se deve ao fato da característica do refletor ser de sua natureza volumétrica, impedindo a perpendicularidade do feixe sônico ser suficiente para detectar com alta sensibilidade a orientação do refletor.

Por outro lado, o laudo radiográfico definiu pela terminologia, o refletor como porosidade, diferenciando significativamente das condições reais nas quais foram inseridas durante o processo de soldagem, conforme pode ser evidenciado nas figuras 4.14 e 5.15.

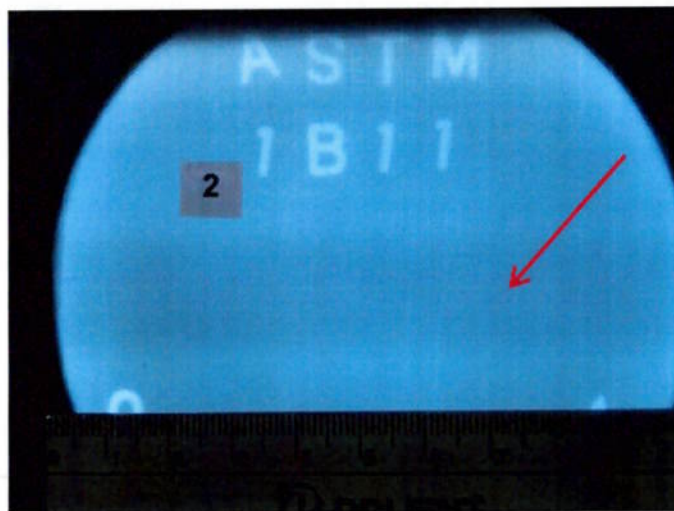


Figura 5.13 – Radiografias da junta CP-USP-02.
A seta vermelha apresenta a detecção do defeito caracterizada como porosidade pelo ensaio radiográfico

Mesmo não sendo possível a visualização nítida do defeito na imagem radiográfica da figura 5.13, o laudo fornecido pelo inspetor responsável caracterizou o refletor como porosidade, podendo ser evidenciado nos relatórios do Anexo A.

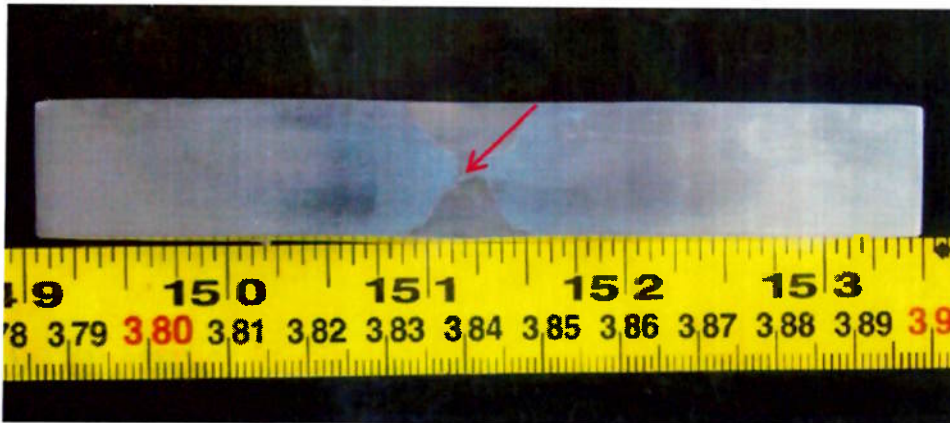


Figura 5.14 – Macrografia do CP-USP-01.

A seta vermelha apresenta a presença da falta de penetração detectada no ensaio por ultrassom convencional e caracterizada como porosidade no ensaio radiográfico.

A macrografia apresentada nas figuras 5.14 e 5.15 não revela a compatibilidade de laudo do ensaio radiográfico com a característica física do defeito, sendo o ensaio por ultrassom de maior confiabilidade para o respectivo refletor no conceito de terminologia.

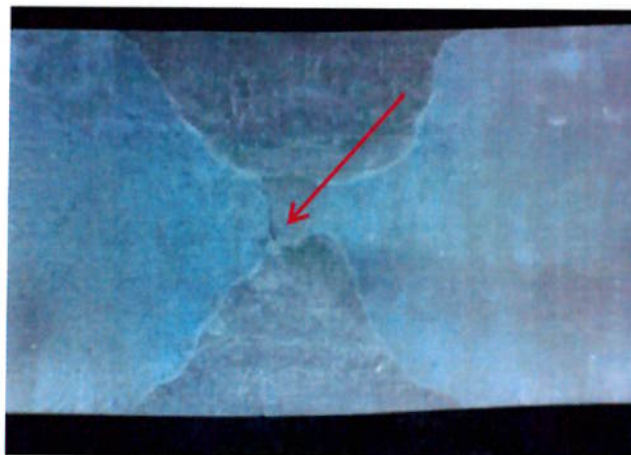


Figura 5.15 – Macrografia localizada do CP-USP-02.

A seta vermelha apresenta a orientação do refletor na junta soldada.

A macrografia da figura 5.15 evidencia que o defeito introduzido na junta soldada não pode ser caracterizado fisicamente como porosidade.

Porém, os resultados das inspeções realizadas no corpo de prova CP-USP-03 apresentaram compatibilidade de laudo entre os ensaios distintos, sendo que os defeitos de porosidade inseridos durante a soldagem foram detectados com amplitude suficiente para reprovação, conforme Norma em ambos os tipos de transdutores utilizados, pois ultrapassa o limite de sensibilidade adquirida na elaboração da curva DAC.

Na figura 5.16(A) a reflexão do defeito com uso do transdutor angular proporciona amplitude acima da sensibilidade imposta na calibração do equipamento.

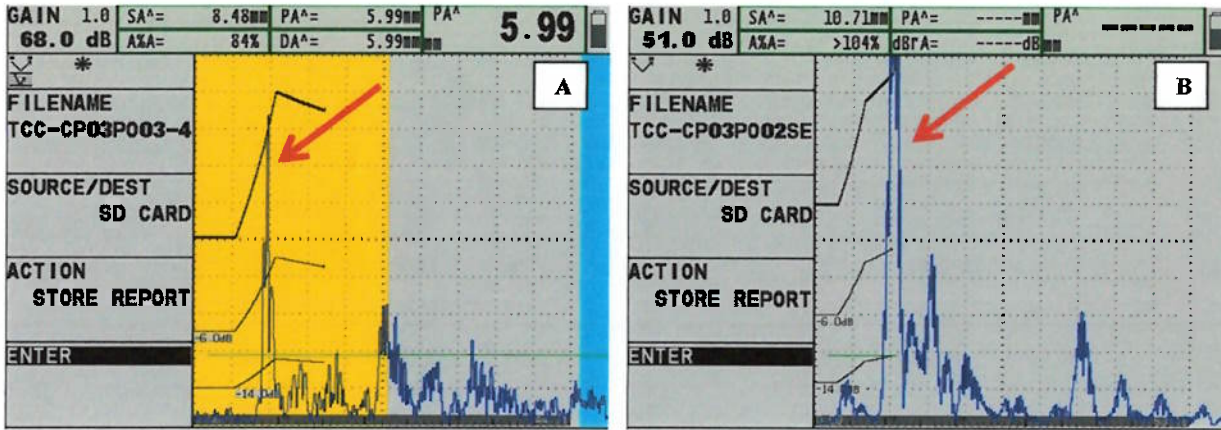


Figura 5.16 – Ecodinâmica da falta de penetração no corpo de prova CP-USP-03
 A) Ecodinâmica da porosidade com transdutor angular B) Ecodinâmica da porosidade com transdutor duplo cristal MSEB4H

Enquanto que na figura 5.16(B) a amplitude da indicação com uso do transdutor duplo cristal proporcionou sensibilidade elevada quando comparado na condição da figura 5.16(A), pois pela característica volumétrica do refletor (porosidade), a condição de inspeção torna-se favorável na utilização de transdutor de feixe reto, desde então a diferença de sensibilidade entre ambas as condições.

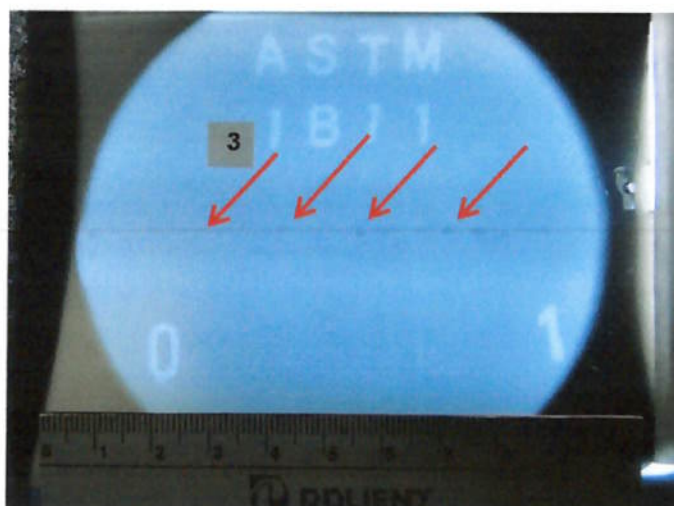


Figura 5.17 – Radiografias da junta CP-USP-03.
 As setas apresentam a localização da porosidade no filme radiográfico

Para a condição radiográfica, a figura 5.17 evidencia a alta sensibilidade na detecção deste tipo de descontinuidade, por se tratar de inclusão gasosa, a porosidade proporciona contraste suficiente no filme radiográfico pela diferença de densidade entre os materiais, consolidando o ensaio como um excelente método de inspeção não destrutiva para tais finalidades de defeito.

Posterior realização da macrografia conforme figuras 5.18 e 5.19, pode-se evidenciar com exatidão a presença da porosidade detectada em ambas as modalidades de inspeção. Vale salientar que para efeito de reparo da porosidade apresentada, seria de grande valia a utilização do ultrassom convencional como ensaio predominante, pois permite o conhecimento exato das profundidades de cada região de interesse no perfil soldado. Como é possível se perceber na figura 5.19, a porosidade não se encontra alinhada em um único plano, mas em profundidades distintas, algo que o ensaio radiográfico não possibilita fornecer a exatidão.

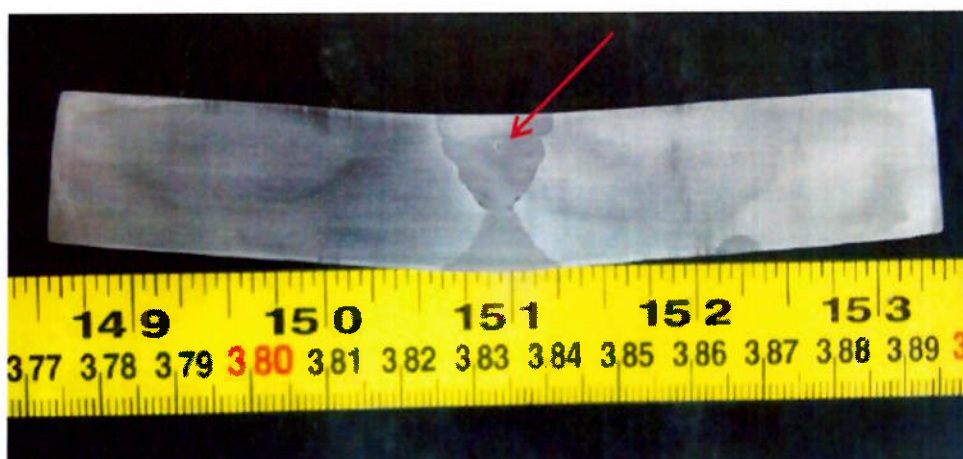


Figura 5.18 – Macrografia do CP-USP-03.
Localização da porosidade no perfil da junta.

Considerando as diferenças fundamentais entre os ensaios, observa-se que cada uma das técnicas possui melhor desempenho em características de descontinuidades distintas, demonstrando que, em situações gerais de inspeção, funcionam como ensaios complementares.

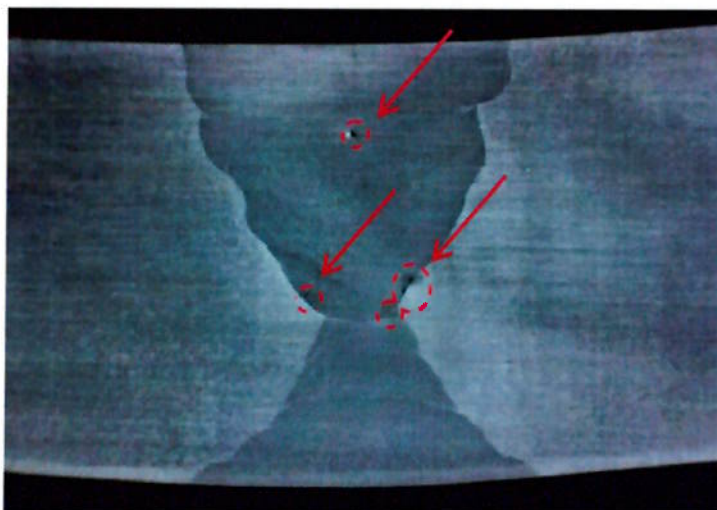


Figura 5.19 – Macrografia localizada do CP-USP-03.
As setas vermelhas identificam a localização da porosidade na junta soldada.

O corpo de prova designado para a elaboração do bloco de calibração conforme figura 4.21 foi denominado como CP-USP-04, na qual o ensaio radiográfico realizado não apresentou descontinuidades de acordo com o relatório no anexo A. O mesmo resultado foi encontrado na realização do ensaio por ultrassom convencional, mantendo as condições de homogeneidade da junta soldada para êxito do bloco elaborado.

Em contra partida, o ensaio radiográfico não apresentou sensibilidade para detecção da trinca que consta no CP-USP-05, como pode ser evidenciado na figura 5.20.



Figura 5.20 – Radiografias da junta CP-USP-05.
Imagem isenta de descontinuidade - aprovada

Na figura 5.21 nota-se a evidencia de inserção da trinca longitudinal no cordão de solda durante a elaboração do corpo de prova. Tal condição possibilita

perceber que a orientação da trinca não está uniforme em uma característica linear, apresentando ramificações em seu eixo, de tal modo a proporcionar área refletora em condição perfeita de detecção para o ensaio por ultrassom convencional.



Figura 5.21 – Inserção de trinca longitudinal no cordão de solda do CP-USP-05.

A figura 5.22 (A) apresenta a imagem da ecodinâmica da trinca detectada com uso dos transdutores angulares, sendo possível a análise que configura a base larga do eco (linha horizontal), uma característica única da trinca quando comparadas com outros tipos de refletores já apresentados. Pelo fato da característica física da trinca ter por sua natureza extremidades entre faces (largura), proporciona a representação do eco nas mesmas condições físicas quando as ondas sônicas refletem em sua superfície.

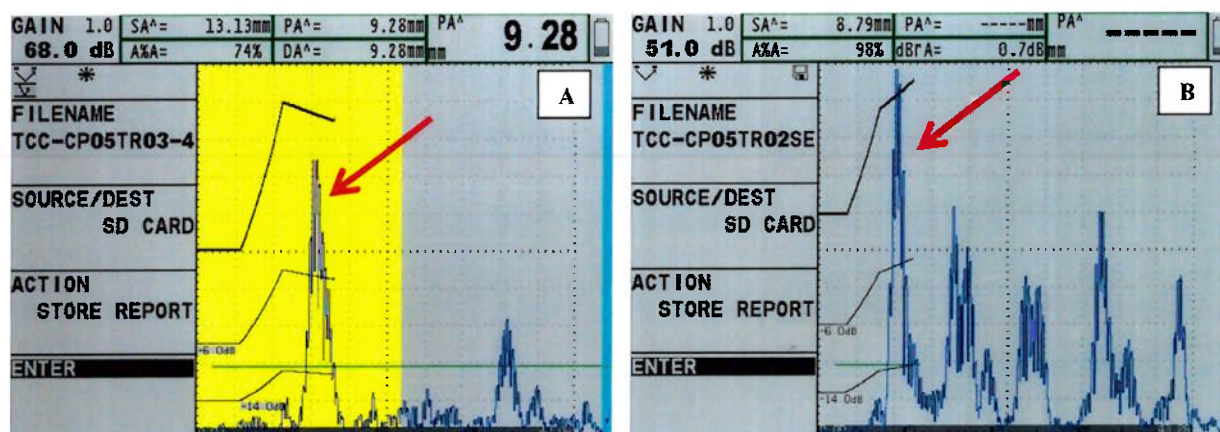


Figura 5.22 – Ecodinâmica da trinca no corpo de prova CP-USP-05

A) Ecodinâmica da trinca com transdutor angular B) Ecodinâmica da trinca com transdutor duplo cristal MSEB4H

Em contrapartida, a alta sensibilidade de detecção com uso do transdutor duplo cristal conforme ilustrado na figura 5.22(B) somente foi possível pelo fato da trinca apresentar características ramificadas em seu plano de deslocamento, como evidenciado na figura 5.21. Por outro lado, caso não fosse possível a presença de tais características, a incidência do feixe sônico não seria interrompido pela interface planar, impossibilitando detecção como refletor. Desta forma, nos permite afirmar que indubitavelmente o ensaio por ultrassom convencional apresenta maior sensibilidade para a detecção de trincas nas condições apresentadas quando comparado ao ensaio radiográfico.

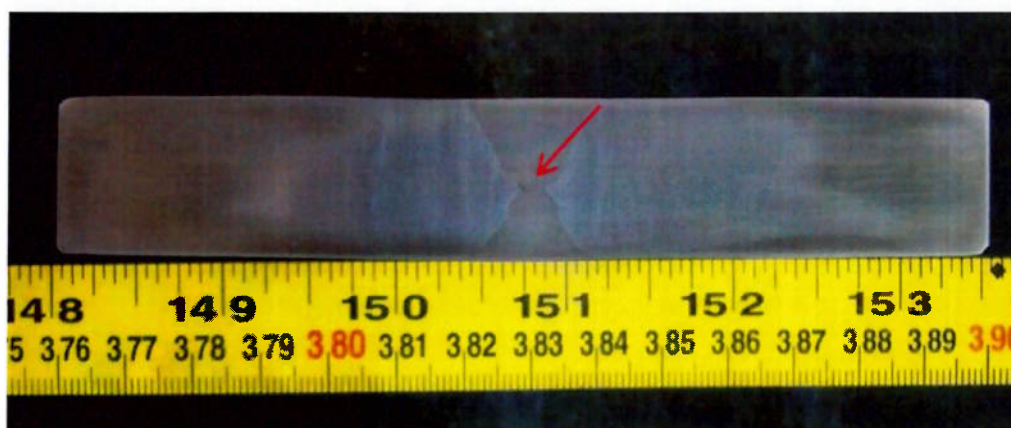


Figura 5.23 – Macrografia do CP-USP-05.
Localização da trinca no perfil da junta.

Pode ser constatado na figura 5.24 a orientação da trinca com ramificação planar, desta forma possibilitando o êxito na detectabilidade com uso de transdutor de feixe reto, conforme já mencionado.

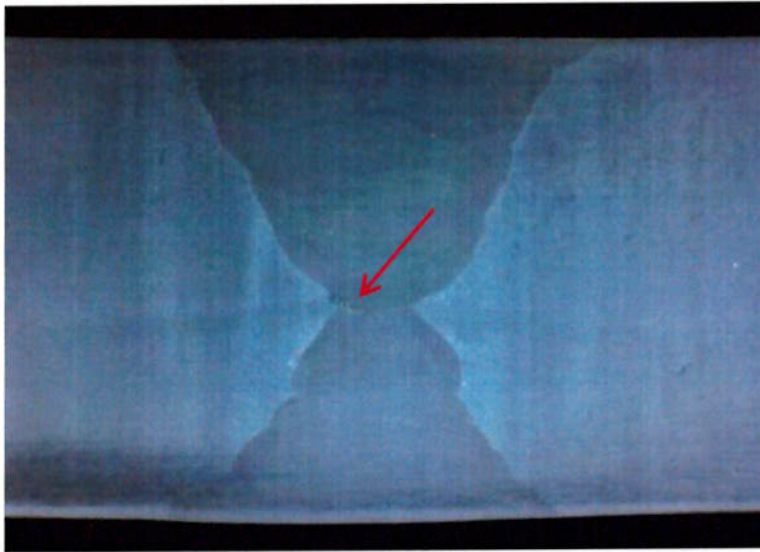


Figura 5.24 – Macrografia localizada do CP-USP-05.
A seta vermelha identifica a localização da trinca na junta soldada.

6 CONCLUSÕES

De acordo com estritamente os materiais, métodos e procedimentos utilizados neste trabalho é possível concluir que:

- a) A inserção do feixe sônico no material inoxidável duplex UNS S32205 é possível com uso de transdutor de ângulo reto de baixa frequência (2Mhz) quando se destina a inspeção para análise volumétrica do metal base, independente da superfície de acoplamento.
- b) A inspeção do metal base com uso de transdutores monocristal e/ou duplo cristal com frequência acima de 2Mhz impossibilita a execução do ensaio pela elevada atenuação para a condição apresentada e pelo índice de ruído no osciloscópio.
- c) Não há diferença significativa de atenuação sônica no material duplex UNS S32205 obtido por meio de fundido quando inspecionado nas direções X, Y e Z para espessura até 30mm, desde que as superfícies de acoplamento sejam planas.
- d) O material duplex UNS S32205 apresenta possibilidade e eficiência de inspeção por partículas magnéticas fluorescentes, quando no estado de matéria prima e superfície usinada.
- e) Não é possível a execução do ensaio por ultrassom convencional com a presença do reforço de solda (acabamento) na junta soldada, quando se destina a avaliação de materiais inoxidáveis, pois a impossibilidade de varredura sob o cordão de solda com uso de transdutores duplo cristal de ângulo reto inviabilizaria significativamente a detecção de refletores com característica planar.

- f) Para refletores localizados paralelamente a face do chanfro como no caso da falta de fusão, torna-se indispensável a utilização de transdutores duplo cristal com incidência angular.

- g) Considerando a totalidade das descontinuidades encontradas, é possível afirmar que o estudo da aplicabilidade por ultrassom convencional no material inoxidável duplex UNS 32205 torna-se eficiente sua aplicabilidade quando atendido aos limites de espessura e variáveis contidos neste trabalho.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- a) Tendo em vista que o estudo foi realizado somente com o aço inoxidável duplex de característica fundida, recomenda-se verificar os resultados obtidos neste trabalho com possibilidade de estudo em material laminado.
- b) Estudar a relação do limite de espessura máxima que mantenha a garantia da aplicabilidade do ensaio.
- c) Pesquisar novos transdutores que proporcionem êxito de inspeção sem a remoção do reforço de solda.
- d) Estudar a aplicabilidade do ensaio em outros processos de soldagem, principalmente no processo de eletrodo revestido no intuito de verificar o comportamento da inclusão de escória no resultado do ensaio.
- e) Realizar um estudo sobre a aplicabilidade do ensaio conforme a morfologia física dos refletores.
- f) Desenvolver técnicas para dimensionamento exato da altura de defeitos planares, principalmente para aplicabilidade de trincas.
- g) Estudar a possibilidade de inspeção em materiais de mesma característica em configuração de junta angular.
- h) Realizar a análise qualitativa da comparação do ensaio radiográfico com o ensaio por ultrassom no referido material e processo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 BLAIR, M. Properties and Selection: Irons, Steel and High Performance Alloys. in: **Steel Casting – Metals Handbook** – ASM International. Vol.1 -10ª Edição. p.363.
- 2 CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6ª Edição. São Paulo: ABM, 1990. 576 p.
- 3 TOTTEN, G.E. **Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies**. in: Duplex Stainless Steels: Brief history and some recent alloys. s.l.: Taylor & Francis Ltd.,2007.
- 4 FEDELE, R.; BRANDI, S. D.; LEBRÃO, S. G. **Soldagem Multipasse do Aço Inoxidável Duplex UNS S31803 por Eletrodo Revestido**. in: Soldagem e Inspeção. Vol. 6, N. 1. 2000, p. 10-16.
- 5 PUPINM, L.A.L.Z. **Influencia do tempo e da temperatura de solubilização na formação da microestrutura duplex no aço UNS S31803**. Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros. 2010. Projeto de Pesquisa.
- 6 ASM HANDBOOK. Properties and Selection: Irons, steel and high performance alloys.
- 7 MAGALHÃES, M., MAGNABOSCO, R. **Formação da fase sigma em aço inoxidável duplex SAF 2205 – efeito de rápido aquecimento entre 700 e 900C**. Relatório final de curso. UNIFEI: 2004, pp. 4-19.
- 8 ALVAREZ-ARMAS, I. **Duplex Stainless Steels: Brief history and some recent alloys**. Recent Patents on Mechanical Engineering, Vol.1. 2008, pp. 51-57.
- 9 GUNN, R.N. **Duplex Stainless Steels: Microstructure, properties and applications**. s.l.: Woodhead Publishing, 1997.
- 10 WESSLING, W.; BOCK, H.E. **Properties and applications of recently developed ferrite-austenitic steel containing 0,02%C, 22%Cr, 3%Mo and 0,12%N in comparassion with molybdenum-alloyed austenitic steels**. in: Stainless Steel 77. Climax Mol. Co.,England: Sept. 26-27, 1977, pg. 217-226
- 11 STREET, J. **Welding duplex stainless steel for arduous service**. Met. Constr., 18(9). 1986, pp. 565-569.
- 12 SNAPE,E.; CHURCH, N.L. **Microduplex processing of low alloy steels**. J. of metals, 24(1):23-29. 1972.
- 13 GIBSON, R. **Estructure and constitution of wrought microduplex stainless steel**. in: Handbook of stainless steel. Peckner,D & Bernstein, I.M.; Mc Graw-Hill, USA 1977, pg. 8- 1 a 8-22.
- 14 CHEN, T.H., Yang, J.R. **Effects of solution treatment and continuous cooling on sigma phase precipitation in a 2205 duplex stainless steel**. Materials Science and Engineering. Vol. A311. 2001, pp. 28-41.)
- 15 S.D. BRANDI e J.C. LIPPOLD, **“Considerações sobre a metalurgia da soldagem dos aços inoxidáveis duplex e superduplex,”** Metalurgia & Materiais, vol. 53, pp.141-146, Março 1997.

- 16 BUDGIFVARS. S. **Duplex Stainless Steels – Material properties and recommendations for welding**. ESAB. Fevereiro, 1986.
- 17 NORMA ASTM A 182 11a Gr.F51
- 18 LIPPOLD. J.C.; KOTECKI, D.J. (2005) **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**, Willey-Interscience. Hoboken, Estados Unidos.
- 19 SOLOMON, H. D.; DEVINE, T. M. **Duplex stainless steels – a tale of two phases**. In: Conference Duplex Stainless Steels 1994. Proceedings. Ohio, 1984, p. 693-757.
- 20 BRANDI, S. Processo TIG. In: WAINER, W.; BRANDI, S.; MELLO, F. (Coord.). **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgar Blücher, 1992. p. 60-98.
- 21 BRACARENSE A. Q. **Processo de Soldagem TIG-GTAW**. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. Apostila disponível em <http://www.infosolda.com.br/download/61dpb.pdf>. Acesso em 10/08/13.
- 22 Norma **PETROBRAS N-1738 Rev. B Jul/2003**.
- 23 SILVA, L. **Líquido Penetrante**. 5ª Edição. São Paulo: ABENDI, 2010. 174 p.
- 24 SILVA JR., S.; MARQUES, P. O Ensaio Radiográfico. In: _____. **Ensaio Não Destrutivos**. Belo Horizonte: 2006. Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/site/cursos/arquivos/168pdf>>. Acesso em: 18 Ago. 2013.
- 25 BALDEV RAJ, T.; B P C, R. Non-destructive testing and evaluation for structural integrity. In.: **Sadhana**. Vol. 20, Part. 1. Kalpakkam – India, 1995. p. 5-38. Disponível em: <http://www.ias.ac.in/j_archive/sadhana/20/1/5-38/viewpage.html>. Acesso em: 29 Jan. 2013.
- 26 COSTA E SILVA, A.; MEI, P. **Aços e Ligas Especiais**. 2ª Edição. São Paulo: Edgard Blucher. p. 417-427.
- 27 ANDREUCCI, R. **Radiologia Industrial**. São Paulo: Abendi, 2009.
- 28 AMERICAN Society of Mechanical Engineers.
- 29 ABENDI. Site na internet. <www.abende.org.br/apostilas_download.html> Acesso em 12/12/13.
- 30 KODAK. Site na internet. <www.kodak.com/US/en/business/aim/industrial/ndt/liter> Acesso em 12/12/13.
- 31 SANTIN, J. **Ultra-som – Técnica e Aplicação**. 2ª Edição. Curitiba: Optagraf, 2003. 276 p.
- 32 MIRANDA, J.; SATO, S. **Ensaio de Ultrassom – Introdução teórica**. Apostila de curso. CETRE, São Paulo. 2010.

- 33 TELECURSO 2000. **Ultra-som**. Apostila. Disponível em: <<http://www.acervotecnico.com.br/2010/02/telecurso-2000-ensaios-de-materiais.html>>. Acesso em: 12 Ago. 2013.
- 34 ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultra-Som**. São Paulo: Abendi, 2008.
- 35 OLYMPUS. **Medidores de Espessura – 38DL Plus**. Site. Disponível em: <<http://www.olympus-ims.com/pt/38dl-plus/>>. Acesso em: 18 Ago. 2013.
- 36 SALOMÃO, C. C. **Comparação entre a inspeção por ultrassom phased array e por ensaio radiográfico na avaliação da qualidade de juntas soldadas de serpentinas**. Monografia - Especialização em Engenharia de Soldagem - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013. 143 p.
- 37 J.CHARLES, **Why and Where Duplex Stainless Steels**. Duplex Stainless Steel '97 Maastricht, the Netherlands, pp29-42.

ANEXO A – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

ANEXO A.1 – Relatório de RX dos CP's

RELATORIO DE INSPEÇÃO RADIOGRAFICO Nº						COSMO 1186 / 2013				FL 01/01			
CLIENTE: POLIEND ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS										DATA: 06/12/2013			
OBRA: LOCAL COSMÓPOLIS - SP.						CONTRATO Nº							
PROCEDIMENTO TÉCNICO: M.T.C. 021 - REV. 23						NORMA: ASME V							
EQUIPAMENTO: CORPO DE PROVA - TCC USP DE 01 a 05 LEANDRO													
TIPO DE RADIAÇÃO: Gama		MARCA DO ISOTOPO		Ir192		POTENCIA OU ATIVIDADE		19 ci		DIMENSÃO DO FOCO 2,7 x 015mm			
MARCA DO FILME: FUJI-50		CLASSE: I		ECRAN DIANTEIRO: 0,005"		ECRAN TRASEIRO: 0,010"		Nº DE FILMES POR CHASSIS: 01					
MATERIAL: UNS S32205				METAL BASE:				PROCESSO DE SOLDAGEM:					
RAD Nº	POS Nº	DIAM mm	ESP mm	REF mm	DFP mm	DPF mm	TECNICA	SOLD	IQI	LOCALIZAÇÃO OU ESPECIFICAÇÃO	LAUDO		TIPO DE DEFEITO
											A	R	
01	0-1	-	16MM	-	750MM	16MM	PSVS	-	1B	CP-01		X	PO/FF
02	0-1	-	16MM	-	750MM	16MM	PSVS	-	1B	CP-02		X	PO
03	0-1	-	16MM	-	750MM	16MM	PSVS	-	1B	CP-03		X	PO/FF
04	0-1	-	16MM	-	750MM	16MM	PSVS	-	1B	CP-04	X		
05	0-1	-	16MM	-	750MM	16MM	PSVS	-	1B	CP-05	X		
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

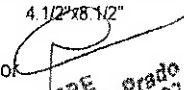
ESP = Espessura da chapa REF = Altura do Reforço DFP min = Distancia Fonte Peça DPF = Distancia peça-filme na mínima dist fonte peça
 T=TRINCA PO=POROSIDADE CO=CONCAVIDADE IE=INCLUSÃO DE ESCORIA PE=PENETRAÇÃO EXCESSIVA
 FP=FALTA DE PENETRAÇÃO MD=MORDEDURA IT=INCLUSÃO DE TUGSTENIO FF=FALTA DE FUSÃO A=APROVADO R=REPROVADO

Total de Filmes 3. 1/2"x17" 3. 1/2"x8 1/2" 4 1/2 x17 12 4. 1/2"x8. 1/2"

Cliente/Fabricante/Montador

Operador

Inspetor


EBE
 Silvio Alves do Prado
 ER-N2-S-1L-SNQC 059?

ANEXO A.2 – Relatório de Macrografia do CP-USP-01

Pg.:1/2



RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: **498.05148-13A-MA**
REPORT NUMBER OF TEST

VIA ORIGINAL
ORIGINAL DOCUMENT

CLIENTE : **POLIEND Soldagem Treinamento e Inspeções**
CLIENT
ENDEREÇO : **Rua Dom Pedro I, 800 - Centro - 13400-410 - Pracicaba - SP.**
ADDRESS

Informações Fornecidas Pelo Cliente Sobre a(s) Amostra(s) Analisada(s):
Information Provide by the Customer About the Specimen to be Analysed.

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA : **CP USP 01 – Falta Fusão**
Sample Identification
MATERIAL INFORMADO : **Inox UNS S32205**
Informed Material
DOCUMENTO : **Solicitação de Ensaio - 13/12/2013**
Document

OBJETIVO: 1. ENSAIO DE MACROGRAFIA.
OBJECTIVE : 1. TEST MACROGRAPHY.



Foto 1. Amostra recebida para ensaios.
Photo 1 Sample received for testing

RESULTADOS OBTIDOS

RESULTS OBTAINED

1 Ensaio Macrográfico:
Test Macrographic



Foto 2. Macrografia da amostra.
Photo 2. Macrographic of sample



Foto 3. Macrografia da amostra.
Photo 3. Macrographic of sample

Amostra <i>Sample</i>	Penetração <i>Penetration</i>	Fusão Raiz <i>Root fusion</i>	Fusão Metal Base/Solda <i>Base Metal Fusion /Welding</i>	Trincas / Poros e Inclusões <i>Cracks / Pores and Inclusions</i>
CP1	Incompleta <i>Incomplete</i>	Incompleta <i>Incomplete</i>	Incompleta <i>Incomplete</i>	1,78 mm
<i>Incerteza Expandida, U^a Expanded Uncertainty, U^a</i>				

Preparação das amostras: Procedimento Interno LT-PT-008 B.
Preparation of specimen: Internal Procedure LT-PT-008 B.

Realização do ensaio: Procedimento Interno LT-PT-008 B.
Realization of test : Internal Procedure LT-PT-008 B.



Laboratorio Metalúrgico

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: **498.05148-13A-MA**
 REPORT NUMBER OF TEST

VIA ORIGINAL
 ORIGINAL DOCUMENT

Instrumentos Utilizados: LT 082-1 - Microscópio Portátil (Régua Graduada) Certificado de Calibração RBC Nº 05418/11 - Validade 04/2014
Instrument Used: Handheld Microscope (ruler graduated) Certificate of Calibration RBC No. 05418/11 - Val. 04/2014

LT 048 - Termohigrômetro Nº 968 - Certificado de Calibração RBC Nº 13185-102 - Validade 06/2014
Term-Hygrometer Nº 968 - Certificate of Calibration RBC Nº 13185-102 - Val. 06/2014

Condições Ambientais: Temperatura: 26°C
Environmental conditions: Temperature: 26°C

* Para todos os valores dimensionais considerar a incerteza expandida, $U = \pm 0,06$ mm.
 * For all dimensional values considering the expanded uncertainty, $U = \pm 0,06$ mm.

A incerteza expandida declarada é baseada em uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência $k=2$ fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

The expanded uncertainty is declared based on a combined standard uncertainty, multiplied by a factor of coverage $k = 2$ providing a confidence level of approximately 95%.

Data recebimento da amostra 13 / 12 / 2013
Date of receipt 12 / 13th / 2013

Data realização do ensaio: 16 / 12 / 2013
Date of realization 12 / 16th / 2013

Responsável pela elaboração: **Tiago Domiciano / Técnico de Laboratório**
Responsible for elaboration: Tiago Domiciano / Laboratory Technician

Data de Emissão, 16 de Dezembro de 2013.

Issue Date, December, 16th 2013.

Eng. Msc. J. Edenil dos Santos
 Gerente Técnico e da Qualidade
 Manager of Technical and Quality
 Mestrado em Eng. Mecânica (Mat. e Processos) - UNICAMP
 Master Mechanical Engineering (Material and Process) - UNICAMP
 CREA: 5062607264
 Signatário Autorizado
 Authorized Signatory

Tiago Domiciano
 Técnico de Laboratório
 Laboratory Technician
 Signatário Autorizado
 Authorized Signatory

DN: cn=Tiago Domiciano,
 o=LABTESTE Análises e Ensaios
 de Materias Metálicas LTDA., ou,
 email=dptecnico@labteste.com.
 br, c=BR
 Date: 2013.12.27 09:58:28 -02'00'

- Este relatório é válido exclusivamente para a amostra analisada nas condições do recebimento, não sendo estendido a quaisquer outras amostras, mesmo que similares.
This report is valid only for the specimen under conditions of receiving and not extend to any other specimen, even if similar.

- A reprodução deste documento somente poderá ser feita integralmente, sem quaisquer alterações.
The reproduction of this document may only be made in full, without any changes.

ANEXO A.3 – Relatório de Macrografia do CP-USP-02

Pg.:1/2



RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: **498.05149-13A-MA**
 REPORT NUMBER OF TEST

VIA ORIGINAL
 ORIGINAL DOCUMENT

CLIENTE : **POLIEND Soldagem Treinamento e Inspeções**
CLIENT
ENDEREÇO : **Rua Dom Pedro I, 800 - Centro - 13400-410 - Piracicaba - SP.**
ADDRESS

Informações Fornecidas Pelo Cliente Sobre a(s) Amostra(s) Analisada(s):
Information Provide by the Customer About the Specimen to be Analysed:

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA : **CP USP 02 – Falta Penetração**
Sample Identification
MATERIAL INFORMADO : **Inox UNS S32205**
Informed Material
DOCUMENTO : **Solicitação de Ensaio - 13/12/2013**
Document

OBJETIVO: 1. ENSAIO DE MACROGRAFIA.
OBJECTIVE : 1. TEST MACROGRAPHY.



Foto 1. Amostra recebida para ensaios.
Photo 1. Sample received for testing.

RESULTADOS OBTIDOS

RESULTS OBTAINED

1 Ensaio Macrográfico:

Test Macrographic



Foto 2. Macrografia da amostra.
Photo 2. Macrographic of sample.



Foto 3. Macrografia da amostra.
Photo 3. Macrographic of sample

Amostra <small>Sample</small>	Penetração <small>Penetration</small>	Fusão Raiz <small>Root fusion</small>	Fusão Metal Base/Solda <small>Base Metal Fusion /Welding</small>	Trincas / Poros e Inclusões <small>Cracks / Pores and Inclusions</small>
CP 2	Incompleta <small>Incomplete</small>	Incompleta <small>Incomplete</small>	Completa <small>Complete</small>	0,10 mm
<small>Incerteza Expandida, U* Expanded Uncertainty, U*</small>				

Preparação das amostras: Procedimento Interno LT-PT-008 B.
Preparation of specimen: Internal Procedure LT-PT-008 B.

Realização do ensaio: Procedimento Interno LT-PT-008 B.
Realization of test : Internal Procedure LT-PT-008 B.



RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: **498.05149-13A-MA**
REPORT NUMBER OF TEST

VIA ORIGINAL
ORIGINAL DOCUMENT

Instrumentos Utilizados: LT 082-1 - Microscópio Portátil (Régua Graduada) Certificado de Calibração RBC Nº 05418/11 - Validade 04/2014
Instruments Used: Handheld Microscope (ruler graduated) Certificate of Calibration RBC No 05418/11 - Val. 04/2014

LT 048 - Termohigrômetro Nº 968 - Certificado de Calibração RBC Nº 13185-102 - Validade 06/2014
Thermohygrometer Nº 968 - Certificate of Calibration RBC Nº 13185-102 - Val. 06/2014

Condições Ambientais: Temperatura: 26°C
Environmental conditions: Temperature 26°C

* Para todos os valores dimensionais considerar a incerteza expandida, $U = \pm 0,06$ mm.
** For all dimensional values considering the expanded uncertainty, $U = \pm 0,06$ mm.*

A incerteza expandida declarada é baseada em uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência $k=2$ fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

The expanded uncertainty is declared based on a combined standard uncertainty, multiplied by a factor of coverage $k = 2$ providing a confidence level of approximately 95%.

Data recebimento da amostra
Date of receipt

13 / 12 / 2013
12 / 13th / 2013

Data realização do ensaio:
Date of realization

16 / 12 / 2013
12 / 16th / 2013

Responsável pela elaboração: **Tiago Domiciano / Técnico de Laboratório**
Responsible for elaboration: Tiago Domiciano / Laboratory Technician

Data de Emissão, 16 de Dezembro de 2013.

Issue Date, December, 16th 2013.

Eng. Msc. J. Edenil dos Santos

Gerente Técnico e da Qualidade
Manager of Technical and Quality

Mestrado em Eng. Mecânica (Mat. e Processos) - UNICAMP
Master Mechanical Engineering (Material and Process) - UNICAMP

CREA: 5062607264

Signatário Autorizado
Authorized Signatory

DN: cn=Tiago Domiciano,
o=LABTESTE Análises e Ensaios
de Materias Metálicos LTDA., ou,
email=dp tecnico@labteste.com.
br, c=BR
Date: 2013.12.27 09:54:54
-02'00'

Tiago Domiciano

Técnico de Laboratório
Laboratory Technician

Signatário Autorizado
Authorized Signatory

- Este relatório é válido exclusivamente para a amostra analisada nas condições do recebimento, não sendo estendido a quaisquer outras amostras, mesmo que similares.
This report is valid only for the specimen under conditions of receiving and not extend to any other specimen, even if similar.

- A reprodução deste documento somente podera ser feita integralmente, sem quaisquer alterações.
The reproduction of this document may only be made in full, without any changes.

ANEXO A.4 – Relatório de Macrografia do CP-USP-03

Pg.:1/2



RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: **498.05150-13A-MA**
 REPORT NUMBER OF TEST

VIA ORIGINAL
 ORIGINAL DOCUMENT

CLIENTE : **POLIEND Soldagem Treinamento e Inspeções**
CLIENT
ENDEREÇO : Rua Dom Pedro I, 800 - Centro - 13400-410 - Piracicaba - SP.
ADDRESS

Informações Fornecidas Pelo Cliente Sobre a(s) Amostra(s) Analisada(s):
Information Provided by the Customer About the Specimen to be Analysed:

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA : **CP USP 03 – Poro**
Sample Identification
MATERIAL INFORMADO : **Inox UNS S32205**
Informed Material
DOCUMENTO : **Solicitação de Ensaio - 13/12/2013**
Document

OBJETIVO: 1. ENSAIO DE MACROGRAFIA.
OBJECTIVE : 1. TEST MACROGRAPHY.



Foto 1. Amostra recebida para ensaios.
Photo 1. Sample received for testing.

RESULTADOS OBTIDOS
RESULTS OBTAINED

1 Ensaio Macrográfico:
Test Macrographic

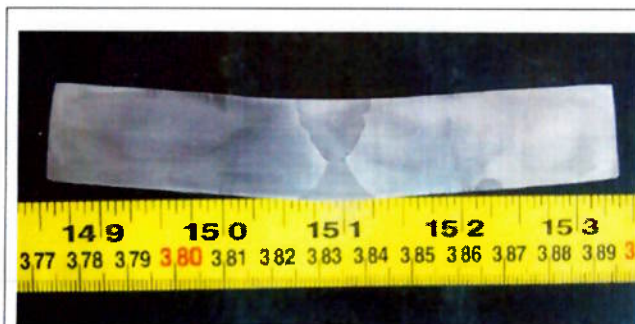


Foto 2. Macrografia da amostra.
Photo 2. Macrographic of sample.

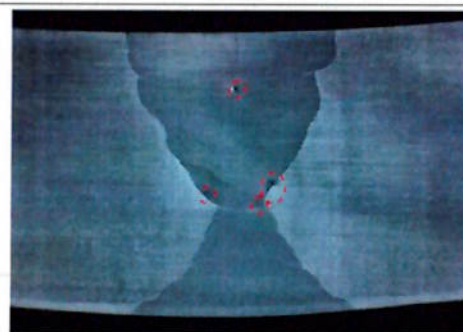


Foto 3. Macrografia da amostra.
Photo 3. Macrographic of sample

Amostra <small>Sample</small>	Penetração <small>Penetration</small>	Fusão Raiz <small>Root fusion</small>	Fusão Metal Base/Solda <small>Base Metal Fusion /Welding</small>	Trincas / Poros e Inclusões <small>Cracks / Pores and Inclusions</small>
CP 3	Incompleta <small>Incomplete</small>	Incompleta <small>Incomplete</small>	Incompleta <small>Incomplete</small>	0,3 e 0,7 mm
<small>Incerteza Expandida, U* Expanded Uncertainty, U*</small>				

Preparação das amostras: Procedimento Interno LT-PT-008 B.
Preparation of specimen: Internal Procedure LT-PT-008 B

Realização do ensaio: Procedimento Interno LT-PT-008 B.
Realization of test : Internal Procedure LT-PT-008 B



RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: **498.05150-13A-MA**
REPORT NUMBER OF TEST

VIA ORIGINAL
ORIGINAL DOCUMENT

Instrumentos Utilizados: LT 082-1 - Microscópio Portátil (Régua Graduada) Certificado de Calibração RBC Nº 05418/11 - Validade 04/2014
Instruments Used: Handheld Microscope (ruler graduated) Certificate of Calibration RBC No. 05418/11 - Val. 04/2014

LT 048 - Termohigrômetro Nº 968 - Certificado de Calibração RBC Nº 13185-102 - Validade 06/2014
Term-Hygrometer Nº 968 - Certificate of Calibration RBC Nº 13185-102 - Val. 06/2014

Condições Ambientais: Temperatura: 26°C
Environmental conditions: Temperature: 26°C

* Para todos os valores dimensionais considerar a incerteza expandida, $U = \pm 0,06 \text{ mm}$.

* For all dimensional values considering the expanded uncertainty, $U = \pm 0,06 \text{ mm}$

A incerteza expandida declarada é baseada em uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência $k=2$ fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

The expanded uncertainty is declared based on a combined standard uncertainty, multiplied by a factor of coverage $k = 2$ providing a confidence level of approximately 95%.

Data recebimento da amostra
Date of receipt

13 / 12 / 2013
12 / 13th / 2013

Data realização do ensaio:
Date of realization

17 / 12 / 2013
12 / 17th / 2013

Responsável pela elaboração: **Tiago Domiciano / Técnico de Laboratório**
Responsible for elaboration: Tiago Domiciano / Laboratory Technician

Data de Emissão, 17 de Dezembro de 2013.

Issue Date, December, 17th 2013.

Eng. Msc. J. Edenil dos Santos
Gerente Técnico e da Qualidade
Manager of Technical and Quality
Mestrado em Eng. Mecânica (Mat. e Processos) - UNICAMP
Master Mechanical Engineering (Material and Process) - UNICAMP
CREA: 5062607264
Signatário Autorizado
Authorized Signatory

DN: cn=Tiago Domiciano,
o=LABTESTE Análises e Ensaos
de Materias Metálicos LTDA., ou,
email=dptecnico@labteste.com.
br, c=BR
Date: 2013.12.27 09:57:13 -02'00'

Tiago Domiciano
Técnico de Laboratório
Laboratory Technician
Signatário Autorizado
Authorized Signatory

- Este relatório é válido exclusivamente para a amostra analisada nas condições do recebimento, não sendo estendido a quaisquer outras amostras, mesmo que similares.
This report is valid only for the specimen under conditions of receiving and not extend to any other specimen, even if similar.

- A reprodução deste documento somente poderá ser feita integralmente, sem quaisquer alterações.
The reproduction of this document may only be made in full, without any changes.

ANEXO A.5 – Relatório de Macrografia do CP-USP-05

Pg.:1/2



RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: **498.05151-13A-MA**
REPORT NUMBER OF TEST

VIA ORIGINAL
ORIGINAL DOCUMENT

CLIENTE : **POLIEND Soldagem Treinamento e Inspeções**
CLIENT
ENDEREÇO : **Rua Dom Pedro I, 800 - Centro - 13400-410 - Piracicaba - SP.**
ADDRESS

Informações Fornecidas Pelo Cliente Sobre a(s) Amostra(s) Analisada(s):
Information Provide by the Customer About the Specimen to be Analysed:

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA : **CP USP 05 – Trinca**
Sample Identification
MATERIAL INFORMADO : **Inox UNS S32205**
Informed Material
DOCUMENTO : **Solicitação de Ensaio - 13/12/2013**
Document

OBJETIVO: 1. ENSAIO DE MACROGRAFIA.
OBJECTIVE : 1. TEST MACROGRAPHY.



Foto 1. Amostra recebida para ensaios.
Photo 1. Sample received for testing.

RESULTADOS OBTIDOS
RESULTS OBTAINED

1 Ensaio Macrográfico:
Test Macrographic



Foto 2. Macrografia da amostra.
Photo 2. Macrographic of sample.

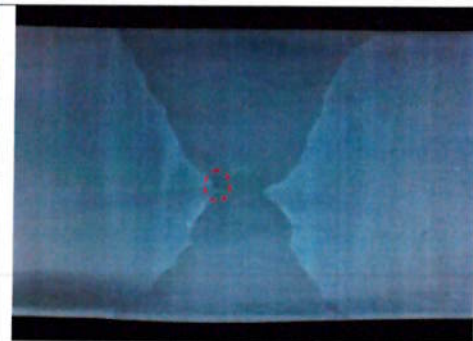


Foto 3. Macrografia da amostra.
Photo 3. Macrographic of sample

Amostra <i>Sample</i>	Penetração <i>Penetration</i>	Fusão Raiz <i>Root fusion</i>	Fusão Metal Base/Solda <i>Base Metal Fusion /Welding</i>	Trincas / Poros e Inclusões <i>Cracks / Pores and Inclusions</i>
CP 4	Incompleta <i>Incomplete</i>	Incompleta <i>Incomplete</i>	Incompleta <i>Incomplete</i>	0,9 mm
<i>Incerteza Expandida, U*</i> <i>Expanded Uncertainty, U*</i>				

Preparação das amostras: Procedimento Interno LT-PT-008 B.
Preparation of specimen: Internal Procedure LT-PT-008 B

Realização do ensaio: Procedimento Interno LT-PT-008 B.
Realization of test : Internal Procedure LT-PT-008 B



RELATÓRIO DE ENSAIO Nº: **498.05151-13A-MA**
REPORT NUMBER OF TEST

VIA ORIGINAL
ORIGINAL DOCUMENT

Instrumentos Utilizados: LT 082-1 - Microscópio Portátil (Régua Graduada) Certificado de Calibração RBC Nº 05418/11 - Validade 04/2014
Instruments Used: Handheld Microscope (ruler graduated) Certificate of Calibration RBC No 05418/11 - Val 04/2014

LT 048 - Termohigrômetro Nº 968 - Certificado de Calibração RBC Nº 13185-102 - Validade 06/2014
Term-Hygrometer Nº 968 - Certificate of Calibration RBC Nº 13185-102 - Val 06/2014

Condições Ambientais: Temperatura: 26°C
Environmental conditions: Temperature 26°C

* Para todos os valores dimensionais considerar a incerteza expandida, $U = \pm 0,06$ mm.
* For all dimensional values considering the expanded uncertainty, $U = \pm 0,06$ mm

A incerteza expandida declarada é baseada em uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência $k=2$ fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

The expanded uncertainty is declared based on a combined standard uncertainty, multiplied by a factor of coverage $k = 2$ providing a confidence level of approximately 95%.

Data recebimento da amostra 13 / 12 / 2013
Date of receipt 12 / 13th / 2013

Data realização do ensaio: 17 / 12 / 2013
Date of realization 12 / 17th / 2013

Responsável pela elaboração: **Tiago Domiciano / Técnico de Laboratório**
Responsible for elaboration: Tiago Domiciano / Laboratory Technician

Data de Emissão, 17 de Dezembro de 2013.

Issue Date, December, 17th 2013.

Eng. Msc. J. Edenil dos Santos
Gerente Técnico e da Qualidade
Manager of Technical and Quality
Mestrado em Eng. Mecânica (Mat. e Processos) - UNICAMP
Master Mechanical Engineering (Material and Process) - UNICAMP
CREA: 5062607264
Signatário Autorizado
Authorized Signatory

DN: cn=Tiago Domiciano,
o=LABTESTE Análises e Ensaios
de Materiais Metálicos LTDA., ou,
email=dp tecnico@labteste.com.
br, c=BR
Date: 2013.12.27 10:00:49 -02'00'

Tiago Domiciano
Técnico de Laboratório
Laboratory Technician
Signatário Autorizado
Authorized Signatory

- Este relatório é válido exclusivamente para a amostra analisada nas condições do recebimento, não sendo estendido a quaisquer outras amostras, mesmo que similares.
This report is valid only for the specimen under conditions of receiving and not extend to any other specimen, even if similar.

- A reprodução deste documento somente poderá ser feita integralmente, sem quaisquer alterações.
The reproduction of this document may only be made in full, without any changes.

ANEXO A.6 – Relatório de líquido penetrante no lingote usinado



RELATÓRIO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO
 NDT REPORT
LÍQUIDO PENETRANTE
 PENETRANT TEST

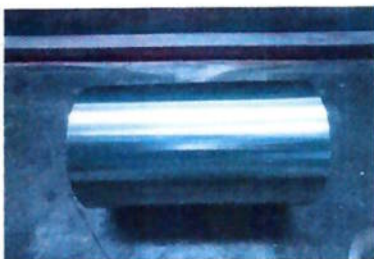


RELATÓRIO Report	TCC-USP-LP01/13	REVISÃO Revision	0	PÁGINA Page	1 de 1	STATUS Status	Emissão inicial
CLIENTE Client	Poliend	OBRA Job	TCC - USP	DOCUMENTO DE INSPEÇÃO Date	-	DATA DE INSPEÇÃO Inspection Date	12/09/2013
DESCRIÇÃO Description	Lingote Fundido		DESENHO Drawing	Dimensão = 100 x 150mm		REVISÃO Review	-
METAL BASE Base Metal	UNS S32205	METAL DE ADIÇÃO Weld Metal	NA	PROCESSO DE SOLDAGEM Welding Process	NA	CONDIÇÕES SUPERFICIAIS Surface Conditions	Usinada
PENETRANTE Penetrant	Magnaflux / Spotcheck	TIPO/LOTE Type/Lot	SKL - WP / F061903	TEMPO Time	15 min.	MÉTODO Method	Tipo II - A
REMOVEDOR Cleaner	Água	TIPO/LOTE Type/Lot	NA	TEMPO Time	5 min.	TEMPERATURA Temperature	24°C
REVELADOR Developer	Magnaflux / Spotcheck	TIPO/LOTE Type/Lot	SKD - S2 / F073659	TEMPO Time	20 min.	LIMPEZA FINAL Final Cleaning	Aplicável
PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO/REV Inspection Procedure/REV	POLIEND LP 01 Revisão 11		NORMA/CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO Code/Acceptance Standards				
				Isendo de indicações			

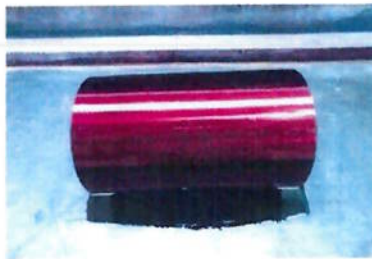
REGISTROS DOS RESULTADOS Results Registration						
JUNTA / PEÇA Joint / Piece	Nº DA INDICAÇÃO Indication Number	LOCAL Place	TAMANHO Size	TIPO DE DEFEITO Defect Type	LAUDO Certificate	
01 Peça	-	-	-	-	A	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	

LEGENDA Legend
 A – APROVADO / Approved R – REPROVADO / Rejected REC – RECOMENDAÇÃO DE EXAME COMPLEMENTAR / Recommended Additional Test
 TL – TRINCA LONGITUDINAL / Long Crack TT – TRINCA TRANSVERSAL / Trans Crack PO – POROSIDADE / Porosity MO – MORDEDURA / Undercut
 OV – SOBREPÓSICÃO / Overlap FF – FALTA DE FUSÃO / Lack of Fusion FP – FALTA DE PENETRAÇÃO / Lack of Penetration

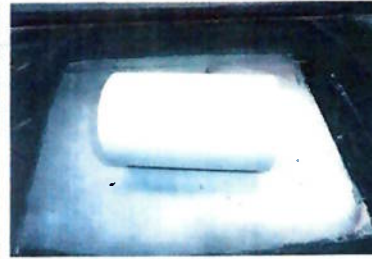
OBSERVAÇÕES Comments
1. Ensaio realizado em 100% das superfícies do lingote usinado;
2. Rastreabilidade do lingote: F51-34787



1. Vista geral do lingote usinado



2. Tempo de penetração



3. Vista após a aplicação do revelador

INSPEÇÃO Inspector
 APROVAÇÃO Approval

INSPEÇÃO AUTORIZADA Authorized Inspector

CLIENTE / FISCALIZAÇÃO Client / Surveillance


Eng. Carlos Leandro de Toledo
 SBC 03493 - LPN2G-ENSAIOS/SE/ES-USN262.1/AE1-
 EV828

DATA / Date **Piracicaba, 12/09/2013** DATA / Date


DATA / Date

DATA / Date

ANEXO A.7 – Relatório de partículas magnéticas no lingote usinado



RELATÓRIO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO
NDT REPORT
PARTÍCULA MAGNÉTICA
MAGNETIC TEST




RELATÓRIO Report	TCC-USP-PM.01/13	REVISÃO Revision	0	PÁGINA Page	1 de 1	STATUS Status	Emissão inicial
CLIENTE Client	Políend		OBRA Job	TCC - USP		DOCUMENTO DE INSPEÇÃO Date	DATA DE INSPEÇÃO Inspection Date
DESCRÇÃO Description	Lingote Fundido		DESENHO Drawing		Dimensão = 100 x 150mm		REVISÃO Review
METAL BASE Base Metal	UNS S32205	METAL DE ADIÇÃO Weld Metal	NA	PROCESSO DE SOLDAGEM Welding Process	NA	CONDIÇÕES SUPERFICIAIS / ESPESSURA Surface Conditions / Thickness	0 Usinada
TÉCNICA DE MAGNETIZAÇÃO/APARELHO Magnetization Method/Instrument	Longitudinal/Yoke	FABRICANTE DO APARELHO/ MODELO Manufacturer / Model	Magnaflux / Y6B	ESPAÇO MAGNETIZADO Magnetized Space	150 mm	MÉTODO Method	Via Úmida
PARTÍCULA / FABRICANTE / LOTE Particle / Manufacturer / Lot	410 Radi Bath BR F053136	CONCENTRAÇÃO Concentration	25 ml/L	DECANTAÇÃO / VERIFICAÇÃO Decantation / Check	0,3 ml / 100 ml OK	VEÍCULO Vehicle	Água
TIPO DE PARTÍCULA / COR Particle Type / Color	Fluorescente / Verde	CONTRASTE / FABRICANTE / LOTE Contrast / Manufacturer / Lot	N.A.	ESPESSURA DO CONTRASTE Contrast Thickness	-	ADITIVO / FABRICANTE / LOTE Aditive / Manufacturer / Lot	410 Red Bath BR - 53136
ILUMINAÇÃO Illumination	Nat: 20 lux/ Flu: 1000 µW/cm ²	TEMPERATURA Temperature	30°C	RESIDUAL MAGNET Magnetic Residual	N.A.	CORRENTE/ AMPERAGEM Current/ Amperage	Alternada
PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO/REV. Inspection Procedure/REV	POLIEND PM 02 Yoke Revisão 6		NORMA/CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO Code/Acceptance Standards		Isento de descontinuidade		


REGISTROS DOS RESULTADOS						
Results Registration						
JUNTA / PEÇA Joint / Piece	Nº DA INDICAÇÃO Indication Number	LOCAL Place	TAMANHO Size	TIPO DE DEFEITO Defect Type	LAUDO Certificate	
01 Peça	-	-	-	-	A	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	

LEGENDA Legend
 A – APROVADO / Approved R – REPROVADO / Rejected REC – RECOMENDAÇÃO DE EXAME COMPLEMENTAR / Recommended Additional Test
 TL – TRINCA LONGITUDINAL / Long Crack TT – TRINCA TRANSVERSAL / Trans Crack PO – POROSIDADE / Porosity MO – MORDEDURA / Undercut
 OV – SOBREPÓSICÃO / Overlap FF – FALTA DE FUSÃO / Lack of Fusion FP – FALTA DE PENETRAÇÃO / Lack of Penetration


OBSERVAÇÕES Comments
 1. Ensaio de partículas magnética realizado em 100% do corpo do lingote usinado;
 2. Rastreabilidade do lingote: F51-34787




1. Vista geral do lingote



2. Vista da magnetização longitudinal do lingote



3. Vista da magnetização axial do lingote

INSPECTOR Inspector	APROVAÇÃO Approval	INSPECTOR AUTORIZADO Authorized Inspector	CLIENTE / FISCALIZAÇÃO Client / Surveillance
 Engº Carlos Leandro de Toledo SINC 00493 - LPM2G-PM2SYSE/ES/LM2SZTAE1- ENR2S DATA / Date Piracicaba, 12/09/2013			
		DATA / Date	DATA / Date

ANEXO A.9 – Relatório de líquido penetrante no disco soldado



RELATÓRIO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO NDT REPORT LÍQUIDO PENETRANTE PENETRANT TEST



RELATÓRIO Report	TCC-USP-LP02/13	REVISÃO Revision	0	PÁGINA Page	1 de 1	STATUS Status	Emissão inicial
CLIENTE Client	Poliend	OBRA Job	TCC - USP	DOCUMENTO DE INSPEÇÃO Date	-	DATA DE INSPEÇÃO Inspection Date	03/12/2013
DESCRIÇÃO Description	Corpos de prova - Soldado		DESENHO Drawing	CP-USP-01 a CP-USP-05		REVISÃO Review	-
METAL BASE Base Metal	UNS S32205	METAL DE ADIÇÃO Weld Metal	NA	PROCESSO DE SOLDAGEM Welding Process	NA	CONDIÇÕES SUPERFICIAIS Surface Conditions	Usinada
PENETRANTE Penetrant	Magnaflux / Spotcheck	TIPO/LOTE Type/Lot	SKL - WP / F061903	TEMPO Time	15 min.	MÉTODO Method	Tipo II - A
REMOVEDOR Cleaner	Água	TIPO/LOTE Type/Lot	NA	TEMPO Time	5 min.	TEMPERATURA Temperature	29°C
REVELADOR Developer	Magnaflux / Spotcheck	TIPO/LOTE Type/Lot	SKD - S2 / F073659	TEMPO Time	20 min.	LIMPEZA FINAL Final Cleaning	Aplicável
PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO/REV Inspection Procedure/REV	POLIEND LP 01 Revisão 11		NORMA/CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO Code/Acceptance Standards		Isendo de indicações		

REGISTROS DOS RESULTADOS Results Registration						
JUNTA / PEÇA Joint / Piece	Nº DA INDICAÇÃO Indication Number	LOCAL Place	TAMANHO Size	TIPO DE DEFEITO Defect Type	LAUDO Certificate	
CP-USP-01	-	-	-	-	A	
CP-USP-02	-	-	-	-	A	
CP-USP-03	-	-	-	-	A	
CP-USP-04	-	-	-	-	A	
CP-USP-05	-	-	-	-	A	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	

LEGENDA Legend
 A – APROVADO / Approved R – REPROVADO / Rejected REC – RECOMENDAÇÃO DE EXAME COMPLEMENTAR / Recommended Additional Test
 TL – TRINCA LONGITUDINAL / Long Crack TT – TRINCA TRANSVERSAL / Trans Crack PO – POROSIDADE / Porosity MO – MORDEDURA / Undercut
 OV – SOBREPÓSICÃO / Overlap FF – FALTA DE FUSÃO / Lack of Fusion FP – FALTA DE PENETRAÇÃO / Lack of Penetration

OBSERVAÇÕES Comments
1. Ensaio realizado em 100% das soldas dos corpos de prova soldados denominados como:
 CP-USP-01
 CP-USP-02
 CP-USP-03
 CP-USP-04
 CP-USP-05



INSPETOR Inspector DATA / Date Piracicaba, 03/12/2013	APROVAÇÃO Approval INSPETOR AUTORIZADO Authorized Inspector DATA / Date	CLIENTE / FISCALIZAÇÃO Client / Surveillance DATA / Date
---	---	---

ANEXO A.10 – Relatório de partícula magnética no disco soldado



RELATÓRIO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO NDT REPORT PARTÍCULA MAGNÉTICA MAGNETIC TEST

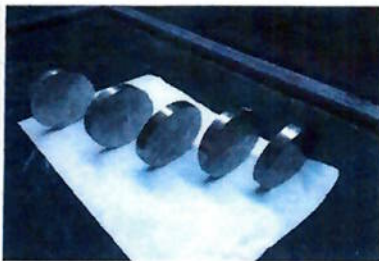


RELATÓRIO Report	TCC-USP-PM.02/13	REVISÃO Revision	0	PÁGINA Page	1 de 1	STATUS Status	Emissão inicial
CLIENTE Client	Poliend		OBRA Job	TCC - USP		DOCUMENTO DE INSPEÇÃO Date	-
DESCRIÇÃO Description	Corpos de prova - Soldado		DESENHO Drawing	CP-USP-01 a CP-USP-05		DATA DE INSPEÇÃO Inspection Date	04/12/2013
METAL BASE Base Metal	UNS S32205	METAL DE ADIÇÃO Weld Metal	NA	PROCESSO DE SOLDAGEM Welding Process	NA	CONDIÇÕES SUPERFICIAIS / ESPESSURA Surface Conditions / Thickness	Usinada
TÉCNICA DE MAGNETIZAÇÃO/APARELHO Magnetization Method/Instrument	Longitudinal/Yoke		FABRICANTE DO APARELHO/ MODELO Manufacturer / Model	Magnaflux / Y6B		ESPAÇO MAGNETIZADO Magnetized Space	150 mm
PARTÍCULA / FABRICANTE / LOTE Particle / Manufacturer / Lot	410 Redi Bath BR F053138	CONCENTRAÇÃO Concentration	25 mL	DECANTAÇÃO / VERIFICAÇÃO Decantation / Check	0,3 ml / 100 ml OK	MÉTODO Method	Via Úmida
TIPO DE PARTÍCULA / COR Particle Type / Color	Fluorescente / Verde		CONTRASTE / FABRICANTE / LOTE Contrast / Manufacturer / Lot	N.A.		VEÍCULO Vehicle	Água
ILUMINAÇÃO Illumination	Nat: 20 lux/ Flu: 1000 µW/cm²		TEMPERATURA Temperature	28°C	RESIDUAL MAGNET. Magnetic Residual	N.A.	CORRENTE/ AMPERAGEM Current/ Amperage
PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO/REV. Inspection Procedure/REV.	POLIEND PM 02 Yoke Revisão 6		NORMA/CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO Code/Acceptance Standards		Isento de descontinuidade		

REGISTROS DOS RESULTADOS Results Registration						
JUNTA / PEÇA Joint / Piece	Nº DA INDICAÇÃO Indication Number	LOCAL Place	TAMANHO Size	TIPO DE DEFEITO Defect Type	LAUDO Certificate	
CP-USP-01	-	-	-	-	A	
CP-USP-02	-	-	-	-	A	
CP-USP-03	-	-	-	-	A	
CP-USP-04	-	-	-	-	A	
CP-USP-05	-	-	-	-	A	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	

LEGENDA Legend
 A – APROVADO / Approved R – REPROVADO / Rejected REC – RECOMENDAÇÃO DE EXAME COMPLEMENTAR / Recommended Additional Test
 TL – TRINCA LONGITUDINAL / Long Crack TT – TRINCA TRANSVERSAL / Trans Crack PO – POROSIDADE / Porosity MO – MORDEDURA / Undercut
 OV – SOBREPÓSICÃO / Overlap FF – FALTA DE FUSÃO / Lack of Fusion FP – FALTA DE PENETRAÇÃO / Lack of Penetration

OBSERVAÇÕES Comments
 1. Ensaio realizado em 100% das soldas dos corpos de prova soldados denominados como:
 CP-USP-01
 CP-USP-02
 CP-USP-03
 CP-USP-04
 CP-USP-05



1. Vista geral das peças



2. Vista da magnetização do disco



3. Vista geral do ensaio

INSPETOR Inspector

APROVAÇÃO Approval

INSPETOR AUTORIZADO Authorized Inspector

CLIENTE / FISCALIZAÇÃO Client / Surveillance

Eng. Carlos Leandro de Toledo

SINCC 03403 - LPM2G-PM02/SY/SES-USP/NSZ VAE1-
EVR2S



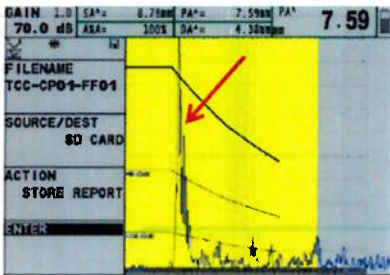
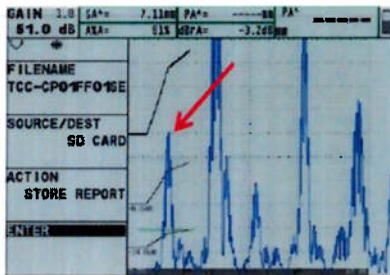
DATA / Date: **04/12/2013**

DATA / Date


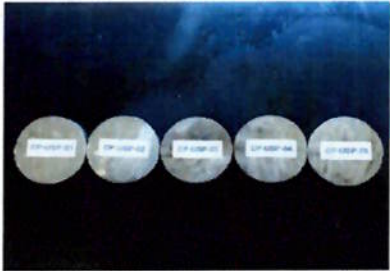
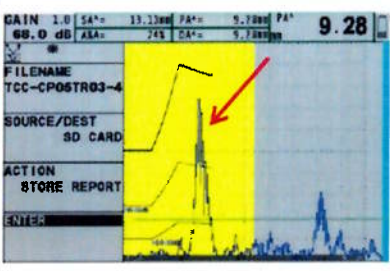
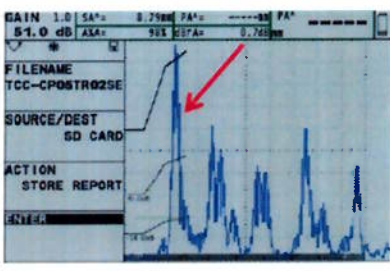
DATA / Date

DATA / Date

ANEXO A.11 – Relatório de ultrassom convencional no CP-USP-01

		RELATÓRIO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO NDT REPORT ULTRASSOM ULTRA SONIC TEST									
RELATÓRIO Report	TCC-USP-US.02/13	REVISÃO Revision	0	PÁGINA Page	1 de 1	STATUS Status	Emissão Inicial				
CLIENTE Client	Poliend			OBRA Job	TCC - USP		DOCUMENTO DE INSPEÇÃO Date	DATA DE INSPEÇÃO Inspection Date			
DESCRÇÃO Description	Corpo de prova - CP-01			DESENHO Drawing	Dimensão = 100 mm		REVISÃO Review	-			
METAL BASE Base Metal	UNS S32205	METAL DE ADIÇÃO Weld Metal	TIGRod - Esab	PROCESSO DE SOLDAGEM Welding Process	GTAW		CONDIÇÕES SUPERFICIAIS Surface Conditions	Uslnada			
TÉCNICA Method	A-Scan		APARELHO / NÚMERO DE SÉRIE Instrument / Serial Number	Phasor XS / 01W2WK		ACOPLANTE Coupling	Carboxi Metil Celulose				
CABO COAXIAL Coaxial Handle	MPLL 2		BLOCO DE CALIBRAÇÃO Calibration Block	V1 / V2		PADRÃO DE REFERÊNCIA Reference Standards	Padrão específico				
TRANSDUTOR Transducer	FREQUÊNCIA (MHz) Frequency (MHz)	ÂNGULO REAL Real Angle	NÚMERO DE SÉRIE Serial Number	DIMENSÕES (mm) Dimension (mm)	GANHO PRINCIPAL Principal Gain	GANHO TRANSFER Transfer Gain	GANHO VARREDURA Work Gain				
MSEB4H	4	0°	Poli 001	Ø 13	51 dB	-	57	dB			
VSY	4	60°	54578	6 X 10	70 dB	-	76	dB			
VSY	4	45°	54577	6 X 10	68 dB	-	74	dB			
DETALHE DE INSPEÇÃO Inspection Detail	LAMINADA Laminate	FORJADO Forged	<input checked="" type="checkbox"/> FUNDIDO Casting	SOLDA Weld	MEDIÇÃO DE ESPESSURA Thickness Measurement		OUTROS Others				
PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO/Rev Inspection Procedure/Rev	POLIEND US 02 Soldas ASME Revisão 3			NORMA/CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO Code/Acceptance Standards							
				Asme V Seção VIII Divisão 1 apêndice 12							
REGISTROS DE RESULTADOS Registers of the Results											
JUNTA/PEÇA Joint/Piece	Nº IND Number	ÂNGULO Angle	LOCAL Place	TAM Size	PROF Depth	PERCURSO Rout	DISTÂNCIA Distance	SUPERFÍCIE Surface	TIPO DEFEITO Defect Type	AMPLIT / % Amplit	LAUDO Certificate
01 Peça - CP 01	1	60°/0°	0	50	8	16	-	Axial	Falta fusão	>100	R
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LEGENDA / Legend	A - APROVADO / Approved R - REPROVADO / Rejected REC - RECOMENDADO EXAME COMPLEMENTAR / Recommended Additional Test UNIDADE / Unit mm										
OBSERVAÇÕES Comments	1. Ensaio realizado em 100% do corpo de prova do CP-01. 2. A indicação caracterizada como falta de fusão encontra-se reprovada pelo critério de aceitação adotado.										
											
1. Vista geral dos corpos de prova			2. Ecodinâmica da indicação com transdutor angular			3. Ecodinâmica da indicação com transdutor reto					
INSPECTOR Inspector	APROVAÇÃO Approval			INSPECTOR AUTORIZADO Authorized Inspector			CLIENTE / FISCALIZAÇÃO Client / Surveillance				
Engº Carlos Leandro de Toledo											
SNOC 03493 - LPN2G-PMN2517/SE/ES-USN252 1/AE1-EV2S											
DATA / Date Piracicaba, 08/12/2013	DATA / Date			DATA / Date			DATA / Date				

ANEXO A.14 – Relatório de ultrassom convencional no CP-USP-05

		RELATÓRIO DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO NDT REPORT ULTRASSOM ULTRA SONIC TEST									
RELATÓRIO Report	TCC-USP-US.05/13	REVISÃO Revision	0	PÁGINA Page	1 de 1	STATUS Status	Emissão Inicial				
CLIENTE Client	Polind		OBRA Job	TCC - USP		DOCUMENTO DE INSPEÇÃO Date	-				
DATA DE INSPEÇÃO Inspection Date	08/12/2013										
DESCRIÇÃO Description	Corpo de prova - CP-05				DESENHO Drawing	Dimensão = 100 mm			REVISÃO Review	-	
METAL BASE Base Metal	UNS S32205		METAL DE ADIÇÃO Weld Metal	TIGRod - Esab		PROCESSO DE SOLDAGEM Welding Process	GTAW		CONDIÇÕES SUPERFICIAIS Surface Conditions	Usinada	
TÉCNICA Method	A-Scan		APARELHO / NÚMERO DE SÉRIE Instrument / Serial Number	Phasor XS / 01W2WK		ACOPLANTE Coupling	Carboxi Metil Celulose		ESPESSURA Thickness	16mm	
CABO COAXIAL Coaxial Handle	MPLL 2		BLOCO DE CALIBRAÇÃO Calibration Block	V1 / V2		PADRÃO DE REFERÊNCIA Reference Standards	Padrão específico		SENSIBILIDADE Sensibility	Ø 2,5mm x 75% x DAC	
TRANSDUTOR Transducer	FREQUÊNCIA (MHz) Frequency (MHz)	ÂNGULO REAL Real Angle	NÚMERO DE SÉRIE Serial Number	DIMENSÕES (mm) Dimension (mm)	GANHO PRINCIPAL Principal Gain	GANHO TRANSFER Transfer Gain	GANHO VARREDURA Work Gain				
MSEB4H	4	0°	Poli 001	Ø 13	51 dB	- dB	57 dB				
VSY	4	60°	54578	6 X 10	70 dB	- dB	76 dB				
VSY	4	45°	54577	6 X 10	68 dB	- dB	74 dB				
DETALHE DE INSPEÇÃO Inspection Detail	LAMINADA Laminate	FORJADO Forged	<input checked="" type="checkbox"/> FUNDIDO Casting	SOLDA Weld	MEDIDAÇÃO DE ESPESSURA Thickness Measurement		OUTROS Others				
PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO/Rev Inspection Procedure/Rev	POLIEND US 02 Soldas ASME Revisão 3				NORMA/CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO Code/Acceptance Standards						
REGISTROS DE RESULTADOS Registers of the Results											
JUNTA/PEÇA Joint/Piece	Nº IND Number	ÂNGULO Angle	LOCAL Place	TAM Size	PROF Depth	PERCURSO Rout	DISTÂNCIA Distance	SUPERFÍCIE Surface	TIPO DEFEITO Defect Type	AMPLIT / % Amplit	LAUDO Certificate
01 Peça - CP 05	1	60°/0°	0	38	8-13	26	-	Axial	Trinca	>100	R
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LEGENDA / Legend A – APROVADO / Approved R – REPROVADO / Rejected REC – RECOMENDADO EXAME COMPLEMENTAR / Recommended Additional Test UNIDADE / Unit mm											
OBSERVAÇÕES Comments											
1. Ensaio realizado em 100% do corpo de prova do CP-05. 2. A indicação caracterizada como trinca encontra-se reprovada pelo critério de aceitação estabelecido.											
											
1. Vista geral dos corpos de prova			2. Ecodinâmica da indicação com transdutor angular				3. Ecodinâmica da indicação com transdutor reto				
INSPETOR Inspector	APROVAÇÃO Approval		INSPETOR AUTORIZADO Authorized Inspector			CLIENTE / FISCALIZAÇÃO Client / Surveillance					
Eng.º Carlos Leandro de Toledo											
SNQC 03493 - LPK2G-PMA25-VSEI6-USK2S2 11AE1-EV25											
DATA / Date Piracicaba, 08/12/2013	DATA / Date		DATA / Date			DATA / Date					

ANEXO B – PROCEDIMENTO DO ENSAIO

ANEXO B.1 – Capa do Procedimento de Líquido Penetrante



**PROCEDIMENTO PARA INSPEÇÃO
POR LÍQUIDO PENETRANTE**

Nº: POLIend LP 01
Revisão: 11
Data: 02/09/2013
Página 1 de 21

Este procedimento é de propriedade da POLIEND sendo que o seu uso por terceiros deverá ser autorizado por carta na capa deste documento.

CONTROLE DE REVISÕES				
REV.	DATA	DESCRIÇÃO	Elaborado	Aprovado
7	06/04/11	Adequação ao ASME V Ed. 2010: Norma ABENDI NA 001: Nova formatação SCQ	Marcelo Salomão	Marcelo Salomão
8	18/03/12	Adequação ao ASME V Ed. 2010 Ad. 2011, N-1596/G e ABNT NBR NM ISO 9712/2010	Marcelo Salomão	Marcelo Salomão
9	02/07/12	Inclusão de produtos fluorescentes	Marcelo Salomão	Marcelo Salomão
10	29-01/13	Adequação Norma ABENDI	Marcelo Salomão	Marcelo Salomão
11	02-09-13	Atendendo comentário durante auditoria de certificação INMETRO	Marcelo Salomão	Marcelo Salomão

Procedimento qualificado de acordo com a norma
ASME V Ed. 2010 e N-1596/G

Eng. Marcelo de Carvalho Salomão
END N3 US/LP/PM – SNQC 00506

ANEXO B.2 – Capa do Procedimento de Partículas Magnéticas



**PROCEDIMENTO PARA INSPEÇÃO
POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS
TÉCNICA DO YOKE**

Nº: POLIend PM C
Revisão: 6
Data: 02/09/2013
Página 1 de 23

Este procedimento é de propriedade da POLIEND sendo que o seu uso por terceiros deverá ser autorizado por carta na capa deste documento.

CONTROLE DE REVISÕES

REV.	DATA	DESCRIÇÃO	Elaborado	Aprovado
3	18/04/11	Adequação ao ASME V Ed. 2010; Norma ABENDI NA 001; Nova formatação SCQ	Marcelo Salomão	Marcelo Salomão
4	18/03/12	Adequação ao ASME V Ed. 2010 Ad. 2011, N-1598/F e ABNT NBR NM ISO 9712/2010	Marcelo Salomão	Marcelo Salomão
5	29/11/13	Adequação Norma ABENDI	Marcelo Salomão	Marcelo Salomão
6	02/09/13	Atendendo comentário durante auditoria de certificação INMETRO	Marcelo Salomão	Marcelo Salomão

Procedimento qualificado de acordo com a norma
ASME V Ed. 2010 e N-1598/F

Eng: Marcelo de Carvalho Salomão
END N3 US/LP/PM – SNQC 00506