CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM *PHASED ARRAY* EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L

Ramon Fonseca Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientador:

Maurício Saldanha Motta

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2013

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM *PHASED ARRAY* EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET-RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Ramon Fonseca Ferreira

Aprovada por:

_____

Prof. Maurício Saldanha Motta, D.Sc. (orientador)

_____

Prof. Hector Reynaldo Menezes Costa, D.Sc.

_____

Prof. Romeu Ricardo da Silva, D.Sc.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2013

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

F383 Ferreira, Ramon Fonseca
Avaliação da técnica de inspeção por ultrassom *phased array* em juntas soldadas de aço inoxidável AISI 304L / Ramon Fonseca Ferreira.—2013.
ix, 77f. : il.color. , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2013.
Bibliografia : f.75-77
Orientador : Maurício Saldanha Motta

1. Ultrassom. 2. Soldagem. 3. Aço inoxidável. I. Motta, Maurício Saldanha (Orient.). II. Título.

CDD 620.11274

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me dar sabedoria para a execução deste trabalho e me permitir concluir mais esta etapa em minha vida profissional.

Aos meus familiares, amigos e todos aqueles que torceram e contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho. Em especial aos meus pais Angela e José Augusto, que me orientam e motivam a seguir em frente.

Ao meu orientador, Maurício Saldanha Motta, pela amizade, incentivo, dedicação, confiança e orientação para a concretização deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudos concedida durante o mestrado.

Ao Centro de Tecnologia SENAI Solda, em especial ao meu Coordenador Lincoln Silva Gomes, Gerente Maurício Ogawa e amigos, pelo incentivo e apoio na utilização de equipamentos, materiais e softwares, para a realização dos ensaios e testes para esta dissertação.

Ao Instituto Federal do Rio de Janeiro – Campus Paracambi, através do Prof. André Rocha Pimenta, na execução das análises de microscopia eletrônica de varredura.

"Quanto mais pesquisas fazemos nesse admirável cenário de coisas, mais beleza e harmonia vemos nelas; e mais forte e nítida são as convicções que elas nos dão do ser, do poder e da sabedoria do Arquiteto Divino".
***Stephen Hales** (1677-1761).*

RESUMO

AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE INSPEÇÃO POR ULTRASSOM *PHASED ARRAY* EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L

Ramon Fonseca Ferreira

Orientador:

Maurício Saldanha Motta

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Os aços inoxidáveis são materiais com utilizações crescentes nas indústrias, devido sua resistência a corrosão e propriedades mecânicas. Porém estes materiais exigem procedimentos de soldagem e inspeção adequados. As técnicas convencionais de ultrassom são raramente utilizadas para avaliar as juntas soldas de aços inoxidáveis austeníticos, por exemplo, devido à elevada atenuação das ondas ultra-sônicas. Como conseqüência, a detecção dos defeitos é prejudicada pelo fraco sinal recebido para a relação de ruído, causando má interpretação dos resultados. Por este motivo foi desenvolvido um estudo visando avaliar a técnica de ultrassom avançado *phased array* neste material, e também identificar uma correlação entre o aporte térmico usado na soldagem, microestrutura resultante com seus efeitos metalúrgicos, atenuação e velocidade sônica, a fim de desenvolver uma metodologia auxiliar de análise do comportamento do feixe sônico, reduzindo erros de interpretação, caracterização e dimensionamento dos defeitos de soldagem na inspeção. Através de amostras de dutos de 16 polegadas de diâmetro foram confeccionados corpos de prova soldados com diferentes aportes térmicos, onde foram avaliadas as texturas das microestruturas, balanço de fases, análise por EDS, mapeamento de dureza e avaliação da velocidade sônica e atenuação dos corpos de prova. Na conclusão do estudo foi possível verificar que através do conhecimento das microestruturas resultantes do processo de soldagem a possibilidade de realizar configurações e calibrações no aparelho de ultrassom *phased array*, através do uso de várias leis focais, ajustando parâmetros como a velocidade sônica para cada região da junta soldada, permitindo assim a redução do efeito de atenuação sônica na detecção e dimensionamento de descontinuidades.

Palavras-chave:

Ultrassom *phased array*; Soldagem; Aço inoxidável austenítico.

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2013

ABSTRACT

TECHNICAL EVALUATION OF ULTRASOUND PHASED ARRAY INSPECTION IN WELDED JOINTS OF AISI 304L STAINLESS STEEL

Ramon Fonseca Ferreira

Advisor:
Maurício Saldanha Motta

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, as partial fulfillment of requirements for degree of Master in Mechanical Engeneering and Materials Technology.

The Stainless steels are materials with increasing use in industries, because these materials have good resistance to corrosion and good mechanical properties. However these materials require welding and inspection procedures. Conventional ultrasound techniques are rarely used to evaluate the joint welds of austenitic stainless steels, for example, due to the high attenuation of ultrasonic waves. As a consequence, the detection of the defects is impaired by the weak signal to noise ratio, causing incorrect interpretation of the results. For this reason it was developed a study to evaluate the advanced phased array ultrasound technique in this material, and also to identify a correlation between heat input used in welding, by the different microstructures, with the attenuation and ultrasonic speed, in order to develop an auxiliary methodology to improve the analysis of the ultrasonic beam in welded joints, reducing problems with the interpretation, characterization and sizing of welding defects. Through samples of 16 inches diameter ducts of AISI 304L were prepared welded specimens with different heat input, which they were evaluated with microstructure analysis, phases balance, analysis with Scanning Electron Microscope, analysis with Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), mapping of Vickers hardness, evaluation of ultrasonic speed and attenuation of the specimens. At the conclusion of the study was possible to verify that through knowledge of the microstructures of welding process the possibility of settings and calibrations in phased array ultrasound device, through the use of multiple focal laws, by adjusting parameters such as the sonic speed for each region of the welded joint, thus reducing the effect of Sonic attenuation in detection and sizing of discontinuities.

Keywords:
Phased array ultrasound; Welding; Austenitic stainless steel.

Rio de Janeiro
February, 2013

Sumário

I Introdução e Objetivos 01

I.1 Introdução 01

I.2 Objetivos 03

II Revisão Bibliográfica 04

II.1 Princípios do Ultrassom em ensaios não destrutivos 04

II.1.1. Efeitos da Interface entre os Materiais 05

II.1.2. Modos de propagação da onda 07

II.1.3. Atenuação Sônica 08

II.1.4. Propriedades Microestruturais através do Ultrassom 09

II.2 Ultrassom *Phased Array* 12

II.2.1. Funcionamento do Ultrassom *Phased Array* 13

II.2.2. Tipos de Transdutores 15

II.2.3. Tipo de Varredura 15

II.2.4. Formação e Focalização do Feixe 18

II.2.5. Tipos de Visualização com *Phased Array* 20

II.3 Aços Inoxidáveis Austeníticos 21

III Metodologia Experimental 28

III.1 Material 28

III.2 Procedimento de Soldagem 30

III.3 Ensaios Metalográficos 32

III.3.1 Ensaio Micrográfico 32

III.3.2 Análise de Percentual de Fases 34

III.3.3 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e EDS (*Energy Dispersive X-ray Detector*) 35

III.3.4 Ensaio de Dureza Vickers 36

III.4 Inspeção por Ultrassom 37

III.4.1 Preparação das amostras de ultrassom 37

III.4.2 Inspeção por Ultrassom 38

III.4.3 – Configuração dos Parâmetros de Inspeção – *ESBEAM TOOLS* 41

III.4.4 Medições de Velocidade Sônica e Atenuação 42

IV Resultados e Discussões 44

IV.1 Efeito dos Parâmetros de Soldagem 44

IV.1.1 Diagrama de Schaeffler 45

IV.1.2 Ensaio Micrográfico 47

IV.2 Análise de Percentual de Fases 57

IV.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Análise por EDS 62

IV.4 Ensaio de Dureza 64

IV.5 Inspeção por Ultrassom 65

IV.5.1 Configuração dos Parâmetros de Inspeção 65

IV.5.2 Medição da Velocidade Sônica 67

IV.5.3 Medição da Atenuação Sônica 69

IV.5.4 Efeito da Velocidade Sônica no Dimensionamento 69

IV.6 Correlação entre os Resultados Microestruturais com Resultados da Inspeção por Ultrassom 71

V Conclusões 73

Trabalhos Futuros 74

Referências Bibliográficas 75

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

I.1 Introdução

A questão do transporte em dutos para o petróleo e seus derivados remonta ao século XIX, porém é só a partir da década de 30 no século passado que esta alternativa de transporte começa a ser utilizada efetivamente. Este fato deve-se principalmente a facilidade de interligar três pontos importantes deste setor: fontes de produção, refinarias e centros de consumo.

No Brasil esta modalidade de transporte iniciou-se em maio de 1942 com a inauguração no Estado da Bahia para atender o escoamento das fontes de produção. Desde então, este serviço tem mostrado um enorme crescimento.

A malha dutoviária do Brasil corresponde a 26 mil km, dados de setembro de 2011, este número faz do País o 16º no ranking mundial, o que ainda é pouco se for levada em consideração a produção massiva nos setores do petróleo e da mineração, principais demandadores deste tipo de transporte (TN PETROLEO, 2012).

A ocorrência de acidentes com este sistema de transporte têm mostrado a enorme complexidade e extensão dos danos causados não só ao patrimônio das empresas, mas, principalmente, com os ecossistemas e as comunidades do entorno destes eventos.

O caso de maior impacto no Brasil ocorreu na Vila Socó em Cubatão em 1984, onde uma das linhas que interliga a Refinaria Presidente Bernardes, em Cubatão, ao Porto de Alemoa, em Santos, rompeu devido a uma corrosão associada à falha operacional. Houve o vazamento de gasolina em uma região alagadiça de manguezal, onde estavam assentadas várias famílias em construções do tipo palafitas. A liberação de um produto inflamável se espalhou com a movimentação das marés e, ocorrendo ignição seguida de incêndio de grandes proporções, causou a morte de 38 pessoas e 53 vítimas além de cerca de quinhentos desabrigados.

O Gás Natural é transportado em alta pressão e, em muito dos casos, os dutos são enterrados ou encontram-se em locais onde sofrem a ação da corrosão, o que exige uma confecção de juntas soldadas devidamente qualificadas e inspecionadas com confiabilidade.

Os aços inoxidáveis são materiais com utilizações crescentes nas indústrias, principalmente por suas características específicas, notadamente aquelas relacionadas à resistência a corrosão e propriedades mecânicas. Porém estes materiais exigem cuidados especiais na sua trabalhabilidade sob o risco de comprometimento de suas propriedades específicas. Dentre estes riscos, destacamos a soldagem dos aços inoxidáveis austeníticos, pois reconhecidamente esta é uma das operações que podem levar a um comprometimento destes materiais. Portanto a utilização de procedimentos inadequados de soldagem pode afetar de forma definitiva algumas características do material, resultando em alterações significativas

no metal de base, principalmente no comportamento mecânico, levando-se em conta defeitos de soldagem, e também, na sua resistência a corrosão (SENAI, 1998).

Após a execução da soldagem são utilizados os ensaios não destrutivos (END) com o objetivo de avaliar a integridade da junta soldada, visando a garantia da confiabilidade de operação do equipamento. O uso dos ensaios não destrutivos tem por finalidade detectar, localizar, dimensionar e eventualmente classificar descontinuidades em materiais. Existem vários tipos de ENDs convencionais ou avançados (visual, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, radiografia, ultrassom, correntes parasitas, radiografia computadorizada, boroscopia industrial, termografia, ultrassom *phased array* e *tofd*, emissão acústica, ondas guiadas, etc.) onde cada um possui suas vantagens e desvantagens, dependendo do material a ser inspecionado, tipo de descontinuidade a detectar, meio em que se encontra o material, entre outros fatores. Portanto, a escolha do método mais adequado depende da aplicação desejada.

Através da escolha dos ensaios e seleção dos melhores parâmetros de inspeção é possível inspecionar juntas soldadas de materiais complexos, como as juntas confeccionadas de aços inoxidáveis austeníticos, avaliando possíveis defeitos provenientes do processo de soldagem durante a fase de construção ou operação do equipamento.

A técnica de inspeção de ultrassom, por exemplo, têm sido rotineiramente utilizada na indústria há cerca de 30 anos, onde esta técnica sempre foi conhecida por apresentar dificuldades na inspeção de componentes fabricados com o aço inoxidável austenítico fundidos ou soldados. A partir dos últimos 8-10 anos que se tem tomado ciência do por que da análise possuir algumas limitações, como por exemplo, o efeito da atenuação do som neste material, onde se teve progresso significativo para a melhoria da técnica através do desenvolvimento da técnica de inspeção por *phased array* (uso de cabeçotes multi-elementos), que permite o melhor controle do feixe sônico e tratamento dos sinais recebidos.

I.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da técnica de ultrassom *phased array*, em juntas soldadas de aço inoxidável austenítico AISI 304L, através de uma metodologia própria, que analisou a influência do aporte térmico dos processos de soldagem, a microestrutura resultante com a detecção de descontinuidades, a fim de permitir o ajuste dos parâmetros de inspeção e permitindo melhor detecção e caracterização dos defeitos no material soldado.

Para alcançar o objetivo principal, propõem-se como objetivos secundários os itens descritos a seguir:

- Analisar os parâmetros de soldagem e sua influência na mudança microestrutural dos aços inoxidáveis austeníticos.
- Confeccionar corpos de prova com diferentes aportes térmicos e materiais de adição, a fim de obter com a soldagem GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding, soldagem,* TIG), diferentes microestruturas no material, onde serão analisados com as técnicas de ultrassom convencional e *phased array*.
- Realizar análises micrográficas com as amostras retiradas dos corpos de prova soldados.
- Realizar ensaio de dureza Vickers nas amostras dos corpos de prova soldados.
- Realizar análises através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) para verificar a existência de ferrita ao longo das regiões do cordão de solda (raiz, enchimento e acabamento) nas amostras.
- Analisar o percentual em área de ferrita e austenita em diferentes áreas do cordão soldado, através de software analisador de imagem.
- Analisar a influência da velocidade sônica no dimensionamento de descontinuidades.
- Correlacionar os percentuais em área de ferrita e austenita, dureza, com as velocidades e atenuações sônicas dos corpos de prova com diferentes microestruturas, comparando-as ao final com o bloco padrão.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1. Princípios do Ultrassom em ensaios não destrutivos

O termo ultrassom aplica-se às ondas mecânicas cuja freqüência excede ao valor máximo perceptível pelo ouvido humano. A frequência do ultrassom possui valores acima de 20 kHz, onde são mais usuais em ensaios não destrutivos os valores de 0,5 a 20 MHz. A velocidade de fase das ondas ultra-sônicas variam em função do modo de propagação que se encontra, pois está relacionada aos parâmetros constitutivos do material. As equação 1, 2 e 3, descrevem três comportamentos de ondas ultra-sônicas, onde as duas primeiras são as mais utilizadas em ensaios não destrutivos, por terem comportamento volumétrico.

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \qquad \text{Equação 1}$$

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)}} \cdot v_L \qquad \text{Equação 2}$$

$$v_L = \left(\frac{0{,}87+1{,}12\mu}{1+\mu}\right) \cdot v_T \qquad \text{Equação 3}$$

onde:

v_L = velocidade de fase da onda longitudinal [m/s];

v_T = velocidade de fase da onda transversal [m/s];

v_S = velocidade de fase da onda superficial [m/s];

E = módulo de elasticidade [N/m^2];

μ = coeficiente de Poisson, definido pela relação adimensional: *((E - 2G) / 2G)*;

G = módulo de rigidez [N/m^2];

ρ = massa específica [kg/m^3].

Em cada modo de propagação a velocidade de fase relaciona-se com a freqüência e o comprimento de onda pela equação 4.

$$v = \lambda \cdot f \qquad \text{Equação 4}$$

onde:

v = velocidade de fase da onda [m/s];

l = comprimento de onda [m];

f = freqüência de oscilação da onda [Hz].

II.1.1. Efeitos da Interface entre os Materiais

As ondas sônicas percorrem meios diferentes até penetrar no material a ser inspecionado e durante esse caminho somente parte dessa onda é absorvida pelo material a ser inspecionado. A impedância acústica está associado à razão entre a pressão sônica e a velocidade da partícula, como mostrado na equação 5. A tabela II.1 cita valores de impedância acústica de alguns materiais.

$$Z = \rho \cdot v \qquad \text{Equação 5}$$

onde:

Z = impedância acústica característica do meio [kg/(m^2 · s)];

ρ = massa específica [kg/m^3];

v = velocidade de fase da onda [m/s].

As propriedades acústicas dos metais e ligas são influenciadas por variações na estrutura e condições metalúrgicas. Conseqüentemente, para uma determinada peça, as propriedades podem ser diferentes dos valores conhecidos na bibliografia. (SANTIN, 2003)

Tabela II.1: Valores de Impedância Acústica para alguns tipos de materiais. Fonte: SANTIN, 2003.

Material	**Impedância Acústica x 10^6 (kg/m^{2}s)**
Alumínio	17064
Aço carbono	46472
Aço inoxidável austenítico	44556
Água	1480
Acrílico	3221
Ferro fundido	3657
Níquel	49544
Óleo automotivo	1514

Também cabe ressaltar que para o caso de incidência normal, os coeficientes de reflexão (*R*) e transmissão (*T*) para as pressões são expressos pelas equações 6 e 7.

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \qquad \text{Equação 6}$$

$$T = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \qquad \text{Equação 7}$$

onde:

R = coeficiente de reflexão para pressão;

T = coeficiente de transmissão para pressão;

Pi = amplitude da onda de pressão do feixe incidente [Pa];

Pr = amplitude da onda de pressão do feixe refletido [Pa];

Pt = amplitude da onda de pressão do feixe transmitido [Pa];

Z1 = impedância acústica característica do meio 1 [kg/(m2 · s)];

Z2 = impedância acústica característica do meio 2 [kg/(m2 · s)];

A onda incidente que ao percorre do transdutor do primeiro meio (Z1) ao segundo meio (Z2), onde parte desta onda é absorvida pelo segundo meio e parte refletida para o primeiro, como mostrado na figura II.1. (SANTIN, 2003)

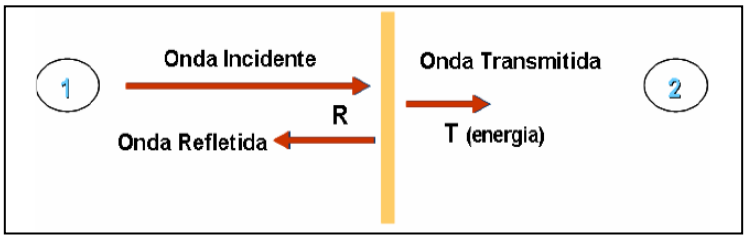


Figura II.1 – Efeito da interface entre materiais diferentes. Fonte: Apostila de Ultrassom – Abendi, 2011.

A onda incidente penetra no material através de um ângulo incidente onde se formam ângulos de reflexão e refração. Os ângulos das direções de propagação das ondas (mostrado na figura II.2) são medidos em relação à direção normal à superfície de incidência, e seus valores são dados pela lei de Snell, que os relaciona com a velocidade de cada onda em seu meio, representada pela equação 8.

$$\frac{\sin(\alpha)}{v_i} = \frac{\sin(\beta)}{v_r} \qquad \text{Equação 8}$$

Onde:

α = ângulo do feixe incidente [radianos];

β = ângulo do feixe refletido ou refratado [radianos];

v_i = velocidade da onda no meio de incidência [m/s];

v_r = velocidade da onda no meio de referência, no qual foi refletida ou refratada [m/s].

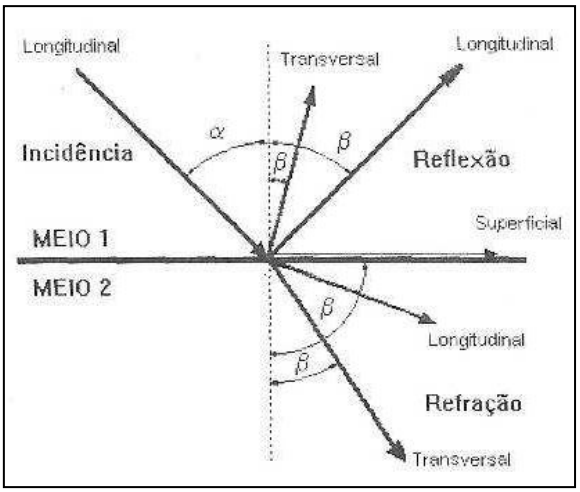


Figura II.2 - Ondas geradas a partir da incidência oblíqua de uma onda longitudinal na interface de dois sólidos. Fonte: SANTIN, 2003.

Esses ângulos α e β são denominados de primeiro e segundo ângulos críticos, respectivamente, e servem de referência na construção de transdutores angulares quando se deseja apenas um modo de propagação no interior do material, a fim de facilitar a interpretação dos sinais gerados. (PIRES, 2009).

Na figura II.3 mostra uma faixa de ângulos de incidência de uma onda longitudinal na cunha de acrílico para os quais a refração no aço ocorre apenas com a onda transversal.

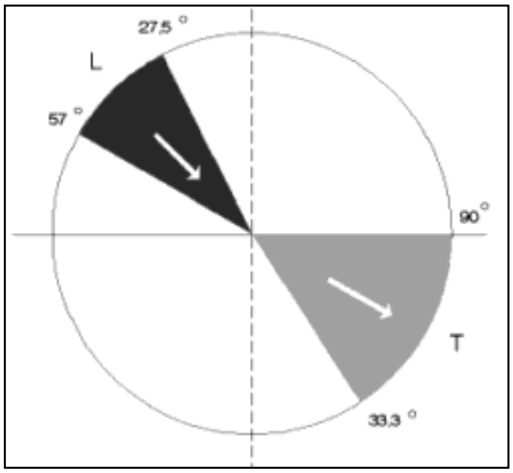


Figura II.3 - Ângulos de incidência de uma onda longitudinal em acrílico para os quais há apenas onda transversal refratada no aço. Fonte: NDT, 2009.

II.1.2. Modos de propagação da onda.

A onda resultante através do ângulo de incidência refrata no interior do material, onde podem tomar um destino diferente ao teórico (através da lei de Snell), que a partir de

obstáculos como a geometria irregular, problemas no acoplamento, e também as propriedades acústicas e microestruturais do material, geram o efeito chamado conversão de modo.

No comportamento dos ângulos, mesmo quando a incidência for oblíqua, os fenômenos de conversão de modo (mudança do tipo de oscilação ou tipo de onda) e refração (mudança na direção de propagação da onda transmitida) devem ser considerados, conforme mostra a figura II.4. (SANTIN, 2003)

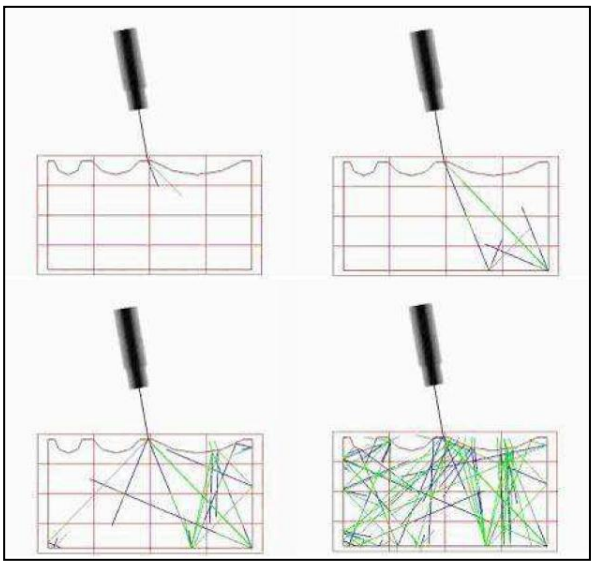


Figura II.4 - Conversões de modo geradas nas sucessivas reflexões em uma peça. O modo longitudinal está representado na cor verde e o transversal na cor azul. Fonte: NDT, 2009.

II.1.3. Atenuação Sônica

A onda sônica ao percorrer um material qualquer sofre, em sua trajetória efeitos de dispersão e absorção, resultando na redução da sua energia ao percorrer um material qualquer. (GINZEL, 2003).

A dispersão deve-se ao fato da matéria não ser totalmente homogênea, contendo interfaces naturais de sua própria estrutura ou processo de fabricação. Por exemplo, fundidos, que apresentam grãos de grafite e ferrita com propriedades elásticas distintas. Para esta mudança das características elásticas de ponto num mesmo material denominamos anisotropia, que é mais significativo quando o tamanho de grão for 1/10 do comprimento de onda. (COSTA, 2011).

A atenuação sônica é baixa quando o tamanho de grão de um material completamente tratado termicamente é pequeno. O fator predominante na medição da atenuação é a relação entre o comprimento de onda do ultrassom e o tamanho do grão do material. O fenômeno da absorção ocorre sempre que uma vibração acústica percorre um meio elástico. É a energia cedida pela onda para que cada partícula do meio execute um movimento de oscilação, transmitindo a vibração às outras partículas do próprio meio. (A. GOPICHAND, 2012).

Portanto, o resultado dos efeitos de dispersão e absorção quando somados resultam na atenuação sônica. Na prática, este fenômeno poderá ser visualizado, quando observamos na tela do aparelho de ultrassom, vários ecos de reflexão de fundo provenientes de uma peça com superfícies paralelas. As alturas dos ecos diminuem com a distância percorrida pela onda. O espalhamento da onda sônica causado pelos contornos de grão é fortemente dependente da relação entre o tamanho de grão e o comprimento de onda do ultrassom. (FONSECA, 2005).

O fenômeno da atenuação é importante na inspeção, pois este fator pode inviabilizar o ensaio. É o caso de soldas em aços inoxidáveis austeníticos, peças forjadas em aços inoxidáveis, que são exemplos clássicos desta dificuldade. O controle e avaliação da atenuação nestes casos é razão para justificar procedimentos especiais de ensaio. A tabela II.2 cita alguns valores de atenuação. (LOBERTO, 2007).

Tabela II.2 – Valores de atenuação sônica em materiais de aço Cr-Ni obtidos em três diferentes processos de fabricação. Fonte: ANDREUCCI, 2011.

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

II.1.4. Propriedades Microestruturais através do Ultrassom.

É possível determinar as propriedades mecânicas e metalúrgicas de um material com o uso do ultrassom, mas para isso é necessário conhecer as características que podem influenciar o comportamento da onda sônica no material a ser inspecionado.

A velocidade e a atenuação sônica são os parâmetros da onda que são modificados e podem, portanto, ser utilizados para estimar as propriedades do material. Uma vez que são conhecidas informações de microestrutura e propriedades mecânicas de um material, por exemplo, também é possível ajustar os parâmetros de inspeção para uma melhor detecção e dimensionamento. (FONSECA, 2005).

A velocidade sônica *v* está relacionada diretamente à constante elástica do material e inversamente à densidade ρ do material de acordo com a equação 9. (FONSECA, 2005).

$$v = \sqrt{\frac{C}{\rho}} \qquad \text{Equação 9}$$

Da equação 9 pode-se inferir que as características dependentes da constante elástica e da densidade do material podem ser determinadas indiretamente pela medida da velocidade sônica.

A equação 9 pode se modificar de acordo com o tipo de onda. Para uma onda longitudinal, C é substituído pelo módulo de Young (E), conforme equação 1. Já para uma onda transversal, C é substituído pelo módulo de cisalhamento (G), conforme equação 2.

Através da combinação das equações 1 e 2 pode-se obter uma equação para estimar o módulo de Young do material (equação 10).

$$E = 4 \cdot 10^{-4} \cdot \mu \cdot \left(\frac{\frac{3}{4} \cdot {v_L}^2 - {v_T}^2}{\frac{{v_L}^2}{{v_T}^2} - 1} \right) \qquad \text{Equação 10}$$

A equação 10 pode ser utilizada também para a estimativa da densidade de aços com o uso da técnica de ultrassom uma vez que se conheça seu módulo de Young e seja possível determinar as velocidades longitudinal e transversal da onda.

A norma ASTM E 495-95 descreve um método para a determinação das velocidades longitudinal e transversal em materiais em com o uso de um padrão. Nesta técnica é feita a medida do tempo de percurso do material em análise e esta é comparada com o tempo de percurso do padrão. O tempo de percurso da onda no material representa a metade do tempo que a onda leva para alcançar a extremidade oposta da amostra e voltar ao transdutor (FONSECA, 2005). Para encontrar a velocidade da onda longitudinal ou transversal na amostra é aplicada a equação 11.

$$v = (A_k \cdot n_i \cdot t_i \cdot v_k)/(A_i \cdot n_k \cdot t_k) \qquad \text{Equação 11}$$

Onde:

Ak = distância entre o primeiro e o enésimo eco de fundo do material conhecido, em metros;

ni = número de ecos medidos no material desconhecido;

ti = espessura do material desconhecido, em metros;

vk = velocidade no material conhecido, em metros por segundo;

Ai = distância entre o primeiro e o enésimo eco de fundo do material desconhecido, em metros;

nk = número de ecos medidos no material conhecido;

tk = espessura do material conhecido, em metros.

Uma vez que o limite de resistência de um aço depende da sua constante elástica, podemos relacionar a velocidade ultra-sônica com o limite de resistência deste material através da relação existente entre velocidade acústica e constante elástica do material. A maior dificuldade reside no fato de que cada um dos fatores que influenciam na constante elástica, como composição química, tamanho de grão e encruamento, tem efeito diferente para a velocidade da onda e para o limite de resistência do aço. (FONSECA, 2005).

Um exemplo do uso da atenuação para detectar diferenças microestruturais é a possibilidade de relacioná-la com o tamanho da grafita em um ferro fundido, podendo deste modo ser relacionada com a própria resistência mecânica do ferro fundido. (BARCOHEN, 1989).

A medida da atenuação pode ser adquirida comparando-se a medida obtida no aço em análise com a atenuação sônica em um bloco padrão de aço, de baixa atenuação. O bloco padrão é um bloco de aço do mesmo material a ser inspecionado com velocidade acústica e medidas conhecidas. Para fazer esta comparação é utilizado um atenuador variável, equipamento amplificador do sinal recebido. Obtém-se assim a medida de uma atenuação relativa. Com o uso do bloco padrão, ou uma amostra com espessura igual à da amostra a ser analisada, ajusta-se a altura do primeiro eco de fundo a uma das marcas da tela do aparelho com o atenuador. Então, sem modificar o sinal, ao fazer a medida na amostra novamente ajusta-se o atenuador até o eco de fundo alcançar a mesma linha do visor. (FONSECA, 2005).

É possível se obter dados de atenuação sônica também através do controle do ganho no equipamento ajustando-se a altura do primeiro eco de fundo da amostra analisada a uma das linhas da tela do equipamento de ultrassom e anotando-se o ganho aplicado. O ganho é diretamente proporcional à atenuação do som. Esta é uma técnica mais simples, mas também utilizada, apesar do maior erro de medida envolvido. (FONSECA, 2005).

A região soldada é anisotropicamente acústica, ou seja, as propriedades acústicas tais como atenuação, dispersão, reflexão, refração, conversão de modo de onda, difração, variam de acordo com a direção do feixe sônico devido à heterogeneidade de orientação de grãos (COSTA, 2011).

O aumento do limite de resistência do aço inoxidável pela maior presença de ferrita, gerando maior tensão interna, é detectada através da técnica de ultrassom, onde a velocidade ultra-sônica e a atenuação aumentam, quando o percentual de ferrita e tamanho dos grãos aumentam. (T.R.G. Kutty, 1987), (P. Li, 1992).

O conhecimento da microestrutura e propriedades mecânicas do metal base e zona fundida de um material soldado permite o ajuste de parâmetros do feixe sônico para uma melhor detecção e dimensionamento das descontinuidades.

A velocidade sônica está diretamente proporcional no dimensionamento das descontinuidades e medição de espessuras. Para o caso de medição de espessura, a norma ASTM E-797 padroniza os métodos de medição. Para medições a altas temperaturas, e maior exatidão das medidas, recomendam-se correções devido à temperatura da peça dos valores lidos no aparelho medidor de espessura. (ASTM E-797, 2010). O valor da espessura real aproximada é determinado através da aplicação direta da equação 12.

$$Er = \frac{Emq \cdot (Vsa - K \cdot \Delta T)}{Vsa}$$ Equação 12

onde:

Er = espessura real (mm);

Emq = espessura da medida a quente (mm);

Vsa = velocidade do som no bloco à temperatura ambiente;

DT = diferença entre a temperatura da superfície do bloco e do material inspecionado (º C).

K = constante de redução da velocidade em função do aumento da temperatura, igual a 1 m/s/ºC.

A velocidade sônica ao ser alterada no aparelho nota-se claramente que o eco de reflexão produzido por uma interface, muda de posição na tela do osciloscópio, permanecendo o eco original em sua posição inicial. O aparelho de ultrassom é basicamente ajustado para medir o tempo de percurso do som na peça ensaiada através da relação: S = v x t onde o espaço percorrido (S) é proporcional do tempo (t) e a velocidade de propagação da onda sônica (n), no material, ajusta-se a leitura para unidade de medida (m/s). (GINZEL, 2003)

Os blocos de calibração devem ser apropriadamente calibrados quanto às suas dimensões, furos, entalhes e quanto à velocidade sônica do material que constituí o bloco, pois uma vez que a velocidade sônica está incoerente ao material do bloco, as dimensões detectadas pelo ultrassom são incoerentes, gerando erros de dimensionamento.

II.2. Ultrassom *Phased Array*

O Ultrassom *phased array* teve seu início a partir da criação de uma patente em 1959 por Tom Brown, onde foi desenvolvido o transdutor anular focalizado dinamicamente. A partir de 1960 este dispositivo ficou restrito ao uso de laboratórios, onde no ano de 1968, Jan C. Somer publicou o primeiro trabalho médico a respeito da varredura eletrônica para diagnose por ultrassom. Nos anos 1970, os físicos são encorajados ao desenvolvimento de novas pesquisas no desenvolvimento da imagem do corpo na área médica (GINZEL, 2003).



Figura II.1: Imagem de ultrassonografia de feto feita através de transdutores de multi-elementos. (Fonte: OLYMPUS, 2010).

No setor industrial a técnica teve seu início a partir dos anos 80, onde houve a consolidação do surgimento de elementos piezo compostos. Nos anos 90, o Ultrassom *phased array* surgiu como um novo método de ensaios, onde a partir do desenvolvimento da capacidade computacional, através do aumento da velocidade na excitação dos vários elementos e capacidade de processamento de dados obtidos nas varreduras consolidou-se como uma nova técnica de inspeção não destrutiva (GINZEL, 2003).

II.2.1. Funcionamento do Ultrassom *Phased Array*

A técnica de Ultrassom *phased array* possui tecnologia capaz de controlar transdutores de multi-elementos, os esses elementos são ativados para a emissão ou recepção de pulsos em um instante de interesse, conforme exemplificado na figura II.2.

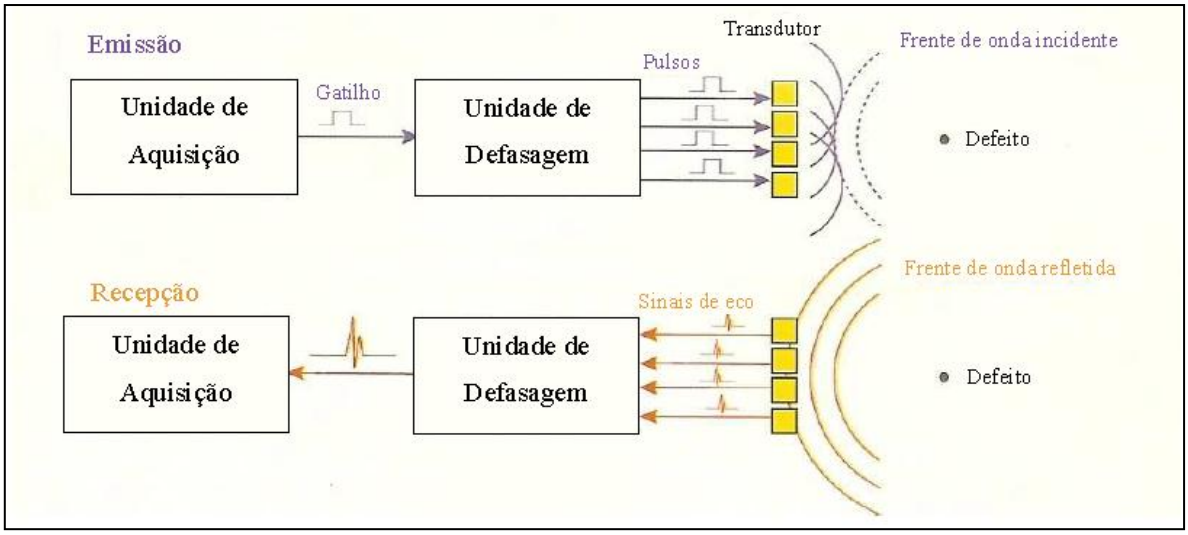


Figura II.2: Princípio de funcionamento do controle eletrônico da emissão e recepção de pulsos com um transdutor de multi-elementos. (Fonte: OLYMPUS, 2010).

No Ultrassom *phased array* ao pulsar elementos individuais ou grupos de elementos com diferentes atrasos cria-se uma série de ondas com pontos de origem que se combinam em uma única frente de onda que viajam em um ângulo selecionado. Este efeito eletrônico é semelhante ao atraso mecânico gerada por uma cunha convencional, mas pode ser mais controlada, alterando-se o padrão de atrasos. Através da interferência construtiva, a amplitude desta onda combinada pode ser consideravelmente maior do que a amplitude de qualquer uma das ondas individuais que produzem. Da mesma forma, os atrasos variáveis são aplicados aos ecos recebidos por cada elemento da matriz a soma das respostas, de forma a representar um único componente angular e / ou focal do feixe total. Além de alterar a direção da frente de onda primária, essa combinação de componentes individuais do feixe permite a focalização do feixe (figura II.3) em qualquer ponto do campo próximo (OLYMPUS, 2010).

O valor de atraso para cada elemento depende da abertura do elemento ativo do transdutor do *phased array*, tipo de onda, ângulo de refração e profundidade do ponto focal. Toda física empregada na técnica do pulso eco com um único cristal e apresentação *A – SCAN* (convencional) é a mesma empregada no *phased array*. Portanto as fórmulas para cálculo da geometria do feixe sônico, atenuação acústica, velocidade do som, tipos de ondas e lei de Snell (leis para reflexão, refração e conversão de modo das ondas) são as mesmas (OLYMPUS, 2010).

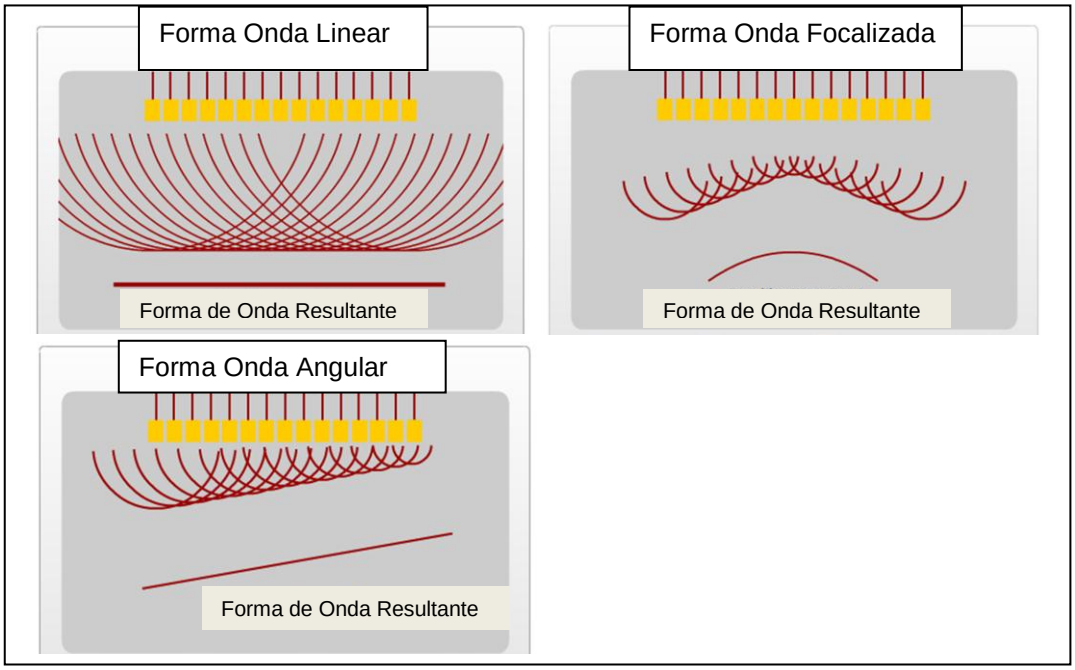


Figura II.3: Exemplo gráfico da forma do feixe sônico pulsado por vários elementos individuais ou grupos, proporcionado pela seleção dos ângulos de propagação. (Fonte: Olympus, 2010).

Os Elementos são geralmente pulsados em grupos de 4 a 32, a fim de melhorar a sensibilidade efetiva pela abertura cada vez maior, o que reduz disseminação indesejada do feixe e permite uma focagem mais nítida.

Os retornos dos ecos são recebidos pelos vários elementos ou grupos de elementos e em seguida são somados. Ao contrário de um transdutor de elemento único convencional, um transdutor de multi-elementos pode ordenar espacialmente a frente da onda e retornar, de acordo com o tempo de chegada e amplitude de cada elemento (OLYMPUS, 2010).

II.2.2. Tipos de Transdutores

Os transdutores de multi-elementos podem possuir vários tipos de disposição geométrica (figura II.4), onde cada formato tem suas vantagens e desvantagens, considerando tanto a facilidade para construí-los e operá-los quanto a forma de varredura que conseguem executar. Nos ensaios não destrutivos o transdutor linear é bastante utilizado atualmente, pois é mais fácil de ser construído e controlado, limitando-se a varreduras em um plano.

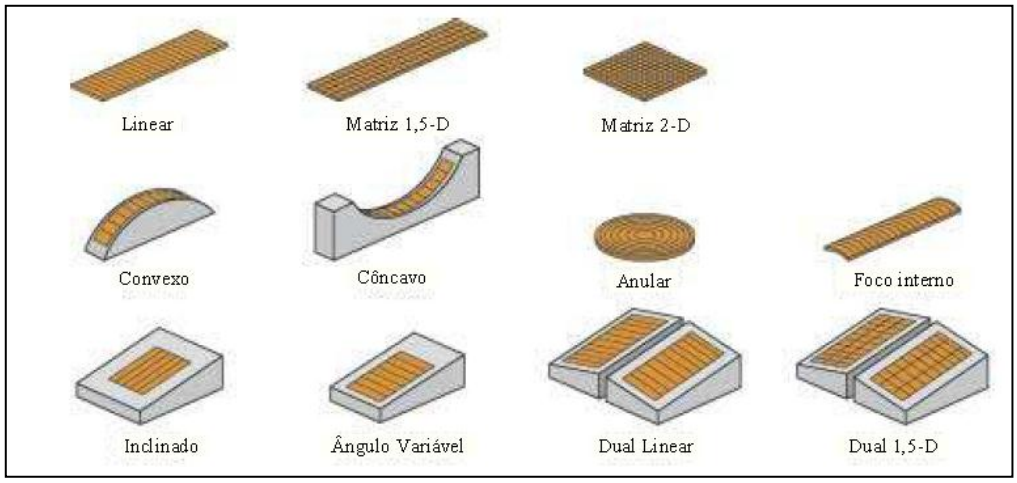


Figura II.4: Tipos de transdutores em função de seu arranjo geométrico.

II.2.3. Tipo de Varredura

O tipo de varredura é outro recurso aplicado ao controle da defasagem eletrônica, além da ativação dos elementos para gerar o pulso. Ao conjunto de elementos selecionados e excitados durante o intervalo de tempo necessário para criar um único pulso dá-se o nome de elementos ativos. Denomina-se lei focal ao conjunto de parâmetros necessários para definir os valores de defasagens aplicados tanto na emissão quanto na recepção destes elementos ativos. O princípio é que, a cada novo pulso a ser emitido (e recebido), haverá uma nova combinação de defasagem entre os elementos ativos, alterando a nova frente de onda, de modo a atender o critério de varredura estabelecido (PIRES, 2009).

Alguns fatores estão dependentes ao tipo de varredura (figura II.5), o primeiro é a geometria da peça inspecionada e das descontinuidades, o segundo é a capacidade de comutação eletrônica do aparelho de ultrassom *phased array*. Estes fatores afetam diretamente o ângulo de incidência com a descontinuidade, o volume inspecionado e o tempo de inspeção.



Figura II.5: Tipos de varredura do feixe para transdutores multi-elementos. (Fonte: OLYMPUS, 2010)

A varredura linear consiste na translação dos elementos ativos sem que haja alteração no ângulo dos feixes, como mostram as Figura II.6 e Figura II.7 para o caso de uma varredura linear com ângulo zero e focalizado.

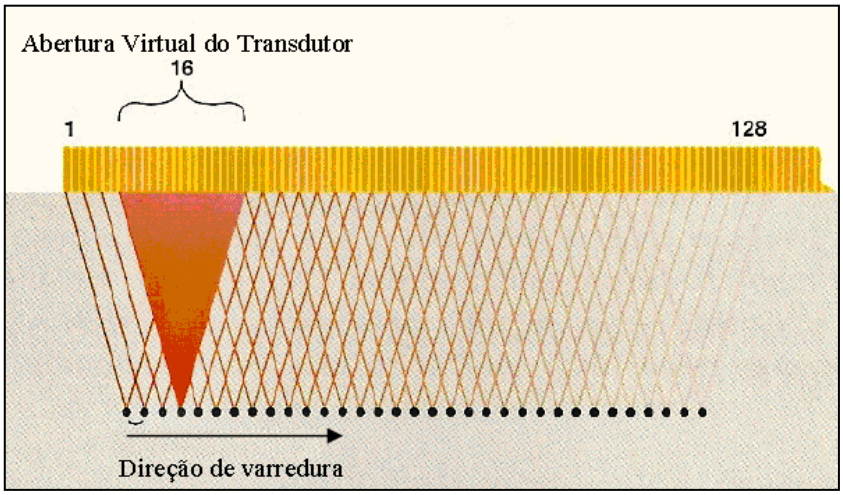


Figura II.6: Exemplo gráfico da varredura Linear em transdutores multi-elementos. (Fonte: OLYMPUS, 2010)

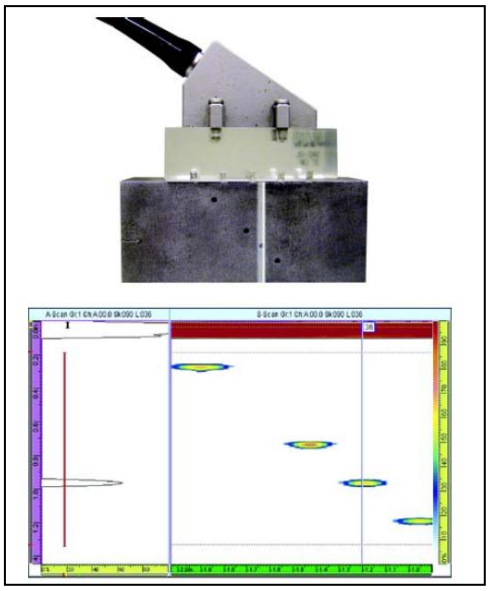


Figura II.7: Exemplo de escaneamento por varredura linear. (Fonte: OLYMPUS, 2010)

A varredura setorial é outro tipo de varredura onde a direção de propagação é variada dentro de um intervalo de ângulos, de modo a cobrir a região de interesse. Este efeito é conseguido alterando-se as defasagens entre os elementos a cada nova lei focal para aumentar ou diminuir o ângulo. Um exemplo de varredura setorial está ilustrado na Figura I.8, em que é sobreposta à peça a imagem obtida no aparelho.

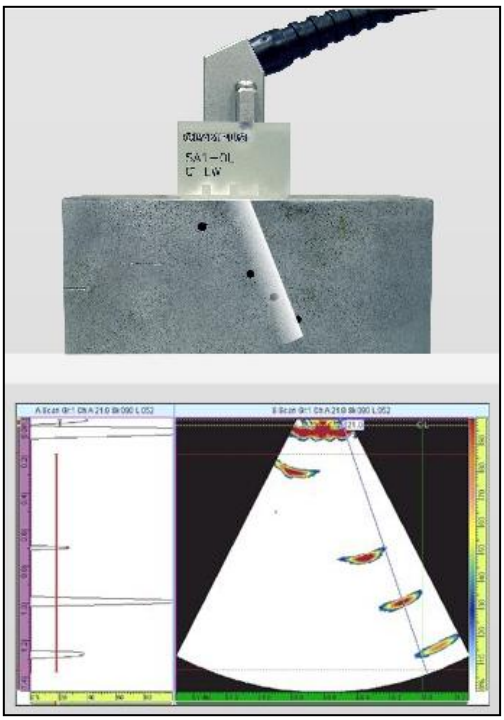


Figura II.8: Exemplo de escaneamento por varredura setorial. (Fonte: OLYMPUS, 2010)

II.2.4. Formação e Focalização do Feixe

Assim como no ultrassom com transdutor convencional, no caso do *phased array* as características geométricas do feixe também são funções da razão entre o comprimento da onda e a dimensão linear da superfície em vibração, seja ela constituída de um ou mais elementos (figura II.9). O conceito fundamental é que quanto menor a dimensão linear do elemento vibrante, maior será o ângulo de divergência na direção daquela dimensão, assim, elementos menores conseguem cobrir ângulos maiores (PIRES, 2009).

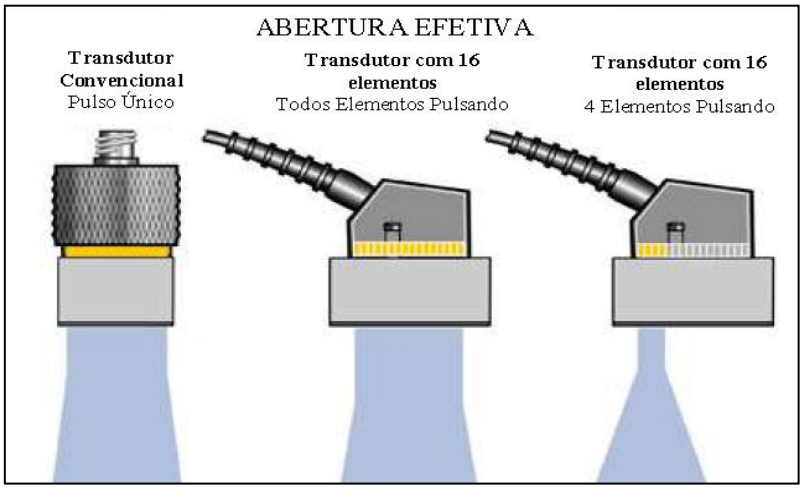


Figura II.9: Conceito de abertura efetiva relacionado à dimensão da superfície em vibração (indicada em amarelo), e sua influência na diretividade do feixe na direção considerada. (Fonte: OLYMPUS, 2009)

A abertura do feixe depende de dois fatores, onde o primeiro é a geometria do transdutor e o segundo corresponde ao valor máximo de abertura que está dependente do número máximo de canais simultâneos do aparelho de ultrassom *phased array*. Esses dois fatores afetam diretamente a geometria do feixe e a detectabilidade de possíveis descontinuidades. (OLYMPUS, 2009).

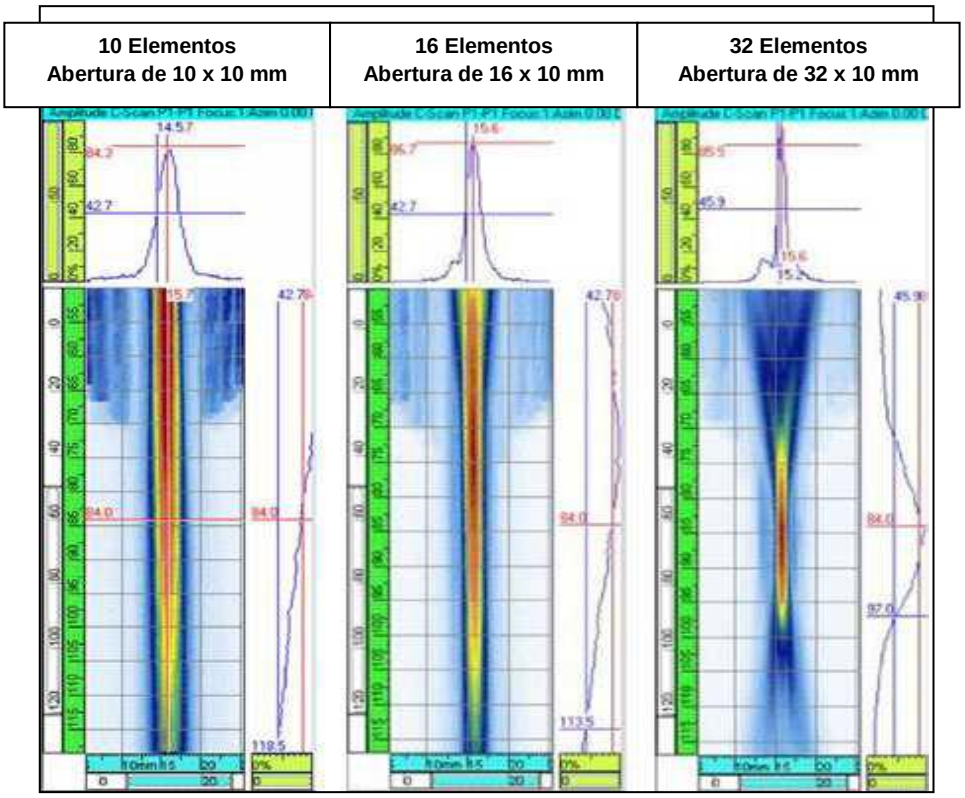


Figura II.10 - Influência da abertura na largura do feixe na região focal. Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

Dessa forma, o aumento da abertura favorece a focalização, conforme figura II.10. Com a energia do feixe concentrada em um volume menor, melhora-se a capacidade de discriminar descontinuidades próximas entre si na direção normal ao eixo do feixe, ou em outras palavras, há melhoria na resolução lateral, conforme figura II.11.



Figura II.11 - Influência do aumento da abertura no aprimoramento da resolução lateral. Fonte: Adaptado de OLYMPUS, 2009.

II.2.5. Tipos de Visualização com *Phased Array*

Os aparelhos de ultrassom *phased array* disponibilizam várias formas de visualização dos resultados obtidos durante a varredura. Dentre eles destaca-se os tipos: *A-scan, B-scan, C-scan e S-scan*.

O tipo *A-scan* é o tipo mais conhecido (figura II.12d). Nele é visualizado um ecograma onde a posição dos picos representa a profundidade da superfície refletora medida a partir do ponto onde o transdutor é posicionado, e a altura dos picos representa a intensidade do sinal recebido, podendo-se medir a partir da altura a atenuação sônica do material.

O tipo *B-scan* uma visualização transversal da peça (figura II.12c). Este método exibe ao operador a varredura completa da peça, sendo muito útil para ensaios de detecção interna de corrosão em tanques e dutos. O ecograma é gerado à medida que o transdutor é deslocado linearmente sobre a peça. Pode-se observar facilmente no ecograma *B-scan* uma das dificuldades dos ensaios por ultrassom ocasionada pela presença da chamada zona cega. A presença de um refletor pode esconder descontinuidades nesta área.

O tipo *C-scan* mostra em seu visor a posição dos refletores num plano paralelo ao plano de varredura do transdutor. A profundidade é apresentada com diferenciação de cores como ocorre em um mapa topográfico (figura II.12a).

O tipo *S-scan* mostra o feixe sônico de forma lateral, de forma a mostrar o tipo de varredura, por exemplo, setorial ou linear (figura II.12b).

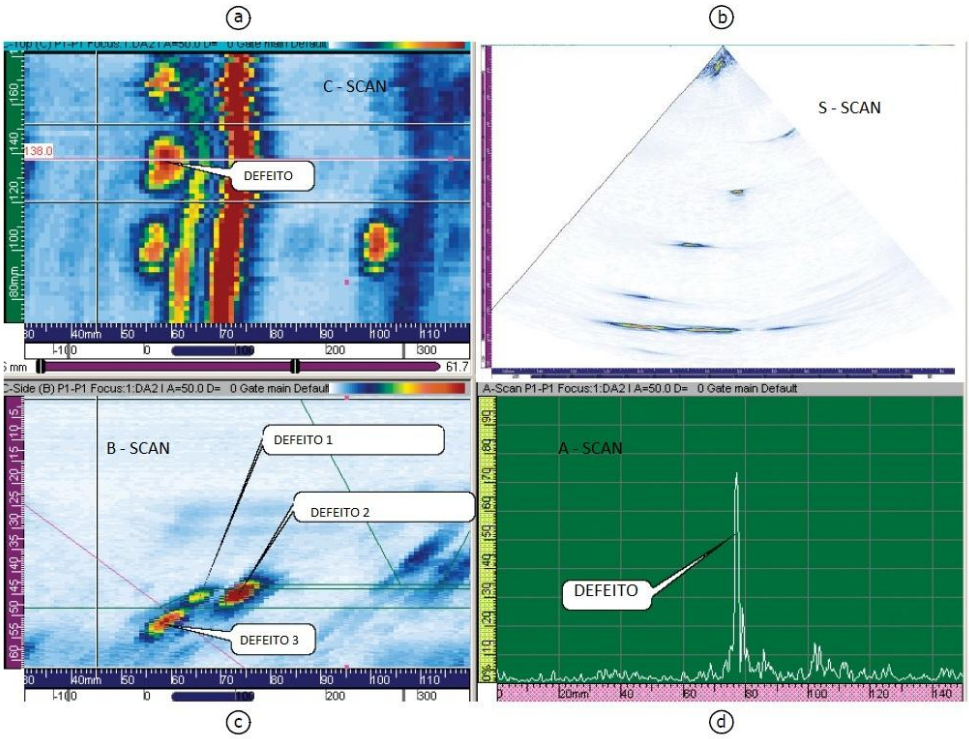


Figura II.12 – Representação dos tipos de visualizações no aparelho de phased array. (a) C-scan; (b) S-scan; (c) B-scan; (d) A-scan.

II.3. Aços Inoxidáveis Austeníticos.

Esta classe de aços inoxidáveis possui em sua composição química elementos de liga que estabilizam a austenita a qualquer temperatura (elementos gamagêneos). O mesmo possui excelentes propriedades de resistência à corrosão e à oxidação, até mesmo a temperaturas elevadas, bem como uma boa soldabilidade. (BARROS, 1988)

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam microestrutura predominantemente austenítica, não sendo endurecíveis por tratamento térmico. Contém cerca de 6 e 26% de níquel, 16 e 30% de cromo e menos de 0,30% de carbono, com um teor total de elementos de liga de pelo menos, 26%. (MODENESI, 2001).

A presença de elementos de liga nos aços inoxidáveis austeníticos permite aportar características quanto a sua microestrutura resultante. A tabela II.3 mostra os principais elementos de liga e seus efeitos na microestrutura destes aços, permitindo variações de resistência a corrosão, resistência a alta temperatura, entre outras características.

Tabela II.3 – Efeitos dos elementos nos aços inoxidáveis austeníticos. Fonte: MODENESI, 2001.

Elemento	Tipos de aços	Efeitos
Carbono	Todos	Promove fortemente a formação de austenita. Pode formar carboneto com o cromo e resultar em corrosão intergranular.
Cromo	Todos	Promove a formação de ferrita. Aumenta a resistência à oxidação e à corrosão.
Níquel	Todos	Promove a formação da austenita. Aumenta a resistência a alta temperatura, resistência a corrosão e ductilidade.
Nitrogênio	XXX N	Promove fortemente a formação de austenita. Aumenta a resistência mecânica.
Nióbio	347	Reduz a sensibilidade à corrosão intergranular combinando com o Carbono. Age como refinador de grão. Promove a formação de ferrita. Aumenta a resistência à fluência.
Manganês	2XX	Estabiliza a austenita à temperatura ambiente, mas forma ferrita a altas temperaturas. Inibe a fragilidade a quente pela formação de MnS.
Molibdênio	316, 317	Aumenta a resistência a alta temperatura. Aumenta a resistência à corrosão em meios redutores. Promove a formação de ferrita.
Fósforo, Selênio, Enxofre	303, 303Se	Melhoram a usinabilidade, mas promovem fissuração de solidificação. Diminuem ligeiramente a resistência à corrosão.
Silício	302B	Aumenta a resistência à formação de carepa e promove a formação de ferrita. Sempre adicionado em pequenas quantidades para desoxidação.
Titânio	321	Reduz sensibilidade à corrosão intergranular combinando com o carbono. Age como refinador de grão. Promove a formação de ferrita.
Cobre	---	Aumenta a resistência à corrosão em certos meios. Diminui a sensibilidade à corrosão sob tensão. Causa efeitos como endurecedores por envelhecimento.

As composições dos aços inoxidáveis austeníticos são balanceadas para minimizar a formação de ferrita delta (δ). A presença desta fase dificulta o trabalho a quente e diminui na resistência à corrosão por pite. A exposição da fase ferrita delta a elevadas temperaturas em certo tempo leva à formação da fase sigma, que é dura e frágil, reduzindo, assim, a ductilidade, tenacidade, resistência à corrosão em frestas e resistência à corrosão por pites. (DANIELLA, 2011).

A microestrutura da solda dos aços da série 300 difere em alguma extensão da microestrutura do metal base, se este for um material trabalhado e solubilizado. A microestrutura deste é constituída, em geral, inteiramente de austenita. Enquanto que a zona fundida pode reter quantidades variáveis de ferrita delta à temperatura ambiente. A microestrutura dos aços da série 300 pode ser analisada com o auxílio do corte (diagrama pseudo-binário, figura II.13) do sistema Fe-Cr-Ni para 70% de ferro.

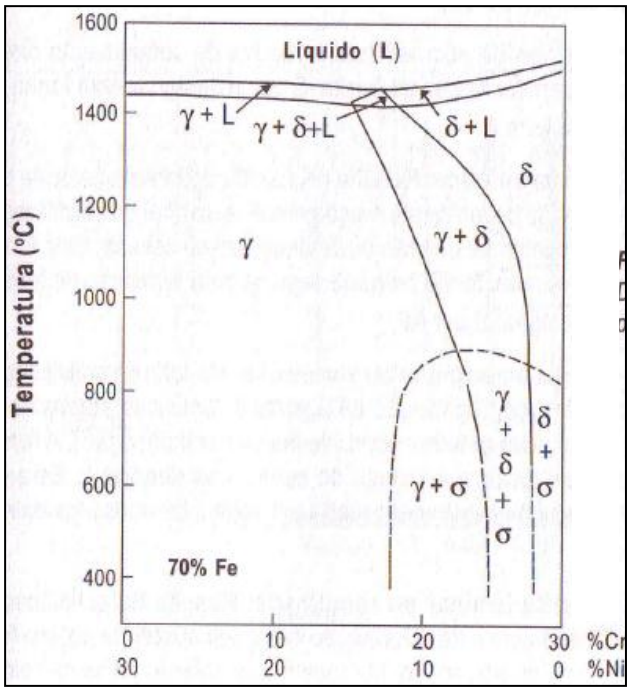


Figura II.13 – Diagrama pseudo-binário Fe-Cr-Ni para um teor de ferro de 70%.. Fonte: MODENESI, 2001.

Por este diagrama, considerando um resfriamento lento, o metal líquido contendo 70% de Ferro e com diferentes quantidades de cromo e níquel pode se solidificar inteiramente como austenita, inicialmente como austenita e posteriormente como ferrita, inicialmente como ferrita e depois como austenita ou, ainda, inteiramente como ferrita, à medida que a relação entre os teores de cromo e níquel aumenta. Durante o resfriamento após a solidificação, toda ou parte da ferrita formada anteriormente pode ainda se transformar em austenita, resultando no último caso em uma microestrutura bifásica com diferentes morfologias. Nestes materiais uma

solidificação com austenita primária (isto é, na qual a austenita é a primeira fase a se solidificar) ocorre para uma relação Cromo/Niquel inferior a 1,5 e a solidificação com ferrita primária ocorre para maiores relações Cromo/Niquel (1,5 a 1,95). Para valores desta relação superiores a cerca de 1,95, o material solidifica-se totalmente como ferrita. (MODENESI, 2001).

A microestrutura final da zona fundida de um aço inoxidável austenítico dependerá da forma de solidificação do aço e das transformações subseqüentes no estado sólido. Esta microestrutura pode ser classificada de acordo com a morfologia da ferrita. As principais microestruturas encontradas (figura II.14), para valores crescentes da relação Cromo/Níquel (MODENESI, 2001) são:

- Austenita: Este tipo de microestrutura resulta da solidificação direta para austenita, sem formação de ferrita.
- Austenita + Ferrita eutética: Resulta de solidificação em austenita primária com formação de ferrita em reação eutética ao final da solidificação e localizada em contornos de grão ou de dendritas ou células.
- Austenita + Ferrita em espinha ou vermicular: Resulta de solidificação em ferrita primária com formação de austenita tanto nas etapas finais desta como já no estado sólido (ao final da solidificação). A ferrita remanescente se localiza ao longo do centro das dendritas. Esta é a morfologia mais comumente observada em soldas de aços inoxidáveis austeníticos.
- Austenita + Ferrita laminar ou rendilhada: Resulta da solidificação em ferrita primária com a transformação desta em austenita ao seu final principalmente no seu estado sólido. Microestrutura característica de soldas com elevada quantidade de ferrita ou resfriadas rapidamente. A austenita aparece na forma de lâminas aproximadamente paralelas com a ferrita remanescente localizada entre as lâminas.
- Ferrita + Austenita de Widmanstatten: Neste caso, a solidificação ocorre somente com a formação de ferrita. A austenita é formada, na matriz de ferrita já completamente solidificada, nucleando nos contornos de grão de ferrita e crescendo como placas para o interior dos grãos. Esta estrutura é mais comum em soldas de aços inoxidáveis duplex.

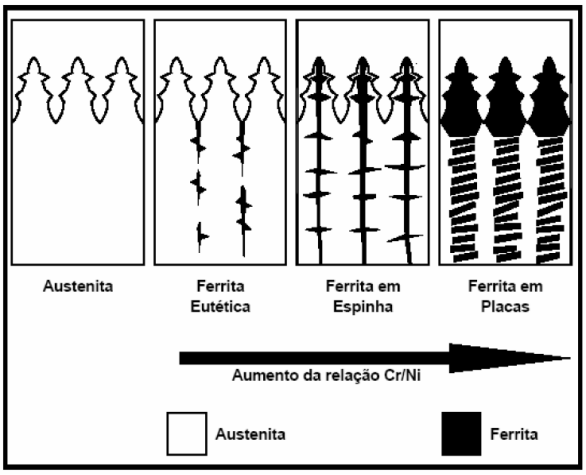


Figura II.14 – Exemplos de morfologias da ferrita *δ* na zona fundida de aços inoxidáveis austeníticos. Fonte: MODENESI, 2001.

Estruturas resultantes da solidificação com austenita primária (a austenita é a primeira fase a se formar) apresentam crescimento celular durante a solidificação. Para valores da relação Cromo/Níquel mais altos, podem apresentar ferrita eutética na forma de glóbulos ou veios localizados entre células ou dendritas, figura II.15. A quantidade de ferrita remanescente à temperatura ambiente é baixa, apresentando um número de ferrita inferior a 4. A morfologia de ferrita em espinha corresponde às menores quantidades de ferrita na microestrutura (número de ferrita entre 2 e 15).



(a) **(b)**

Figura II.15 – Microestrutura da zona fundida de um aço AISI 304L soldado com o processo GTAW (TIG) com gás de proteção Ar-N_2. O nitrogênio devido ao seu efeito fortemente gamagênico, favoreceu a formação de uma microestrutura **(a)** basicamente de austenita e **(b)** nas regiões em que seu efeito do nitrogênio foi menor, com ferrita eutética e em espinha. Microscopia ótica 500X. Fonte: MODENESI, 2001.

No caso de uma junta soldada, para uma certa espessura de chapa e sua condutibilidade térmica, quanto maior o aporte de calor, menor será a taxa de resfriamento da junta soldada, afetando indiretamente a microestrutura não apenas da zona fundida, mas

também do metal de base, na região conhecida por ZTA (Zona Termicamente Afetada). (CALLISTER, 1991)

A microestrutura da solda não depende somente da velocidade de resfriamento e da razão de Cromo/Níquel. Em particular, os outros elementos de liga adicionados ao aço também afetam a estabilidade relativa das fases. Para classificar o efeito destes elementos, estes foram divididos em formadores de ferrita (por exemplo, Cr, Mo, Si, Nb e Al) e de austenita (por exemplo, Ni, C, N, Mn). O seu efeito relativo na formação de uma fase ou outra é, em geral, expresso em termos de equivalente de cromo e de equivalente de níquel, e também a sua influência combinada pode ser apresentada em diagramas constitucionais empíricos. Destes, o mais conhecido e muito utilizado até hoje, é o diagrama elaborado por Schaeffler na década de 40.

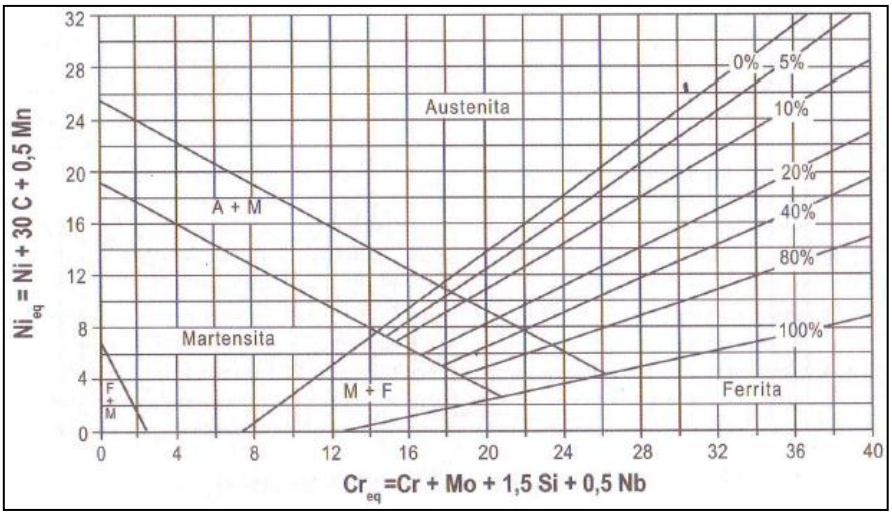


Figura II.16 – Diagrama de Schaeffler. A = austenita, F = ferrita, M = martensita. Fonte: MODENESI, 2001.

O diagrama de Schaeffler, figura II.16, permite prever a microestrutura da zona fundida da solda com base na sua composição química e não é restrito aos aços inoxidáveis austeníticos, podendo ser usado também para aços ferríticos e martensíticos. Para utilizá-lo, os equipamentos de Cr e Ni devem ser calculados pela composição química da solda e a microestrutura é determinada pela leitura direta no diagrama do campo onde o ponto (Cr_{eq}, Ni_{eq}) se localiza. Quando as composições dos metais base e de adição são diferentes, o ponto que representa a solda no diagrama estará sobre o segmento de reta entre o metal base e o metal de adição. A posição desse ponto no segmento dependerá da diluição da solda, ficando mais próximo do metal de adição para soldas de pequena diluição. (MODENESI, 2001)

Para exemplificar, um aço inoxidável ferrítico AISI 430 (0,03%C, 0,9%Mn, 0,4%Si e 17,3%Cr) tenha sido soldado com um eletrodo AWS E309 (0,06%C, 0,7%Mn, 0,7%Si, 22,1%Cr e 12,5%Ni). Os valores dos equivalestes de cromo e níquel seriam:

- Metal base: Cr_{eq} = 17,9 e Ni_{eq} = 1,4%
- Metal de adição: Cr_{eq} = 23,2 e Ni_{eq} = 14,7%

A figura II.17 mostra, no diagrama, os pontos deste exemplo correspondestes ao metal base, metal de adição e ao metal de solda para uma diluição para 30%. Neste caso, a solda teria cerca de 15% de ferrita delta em sua microestrutura.

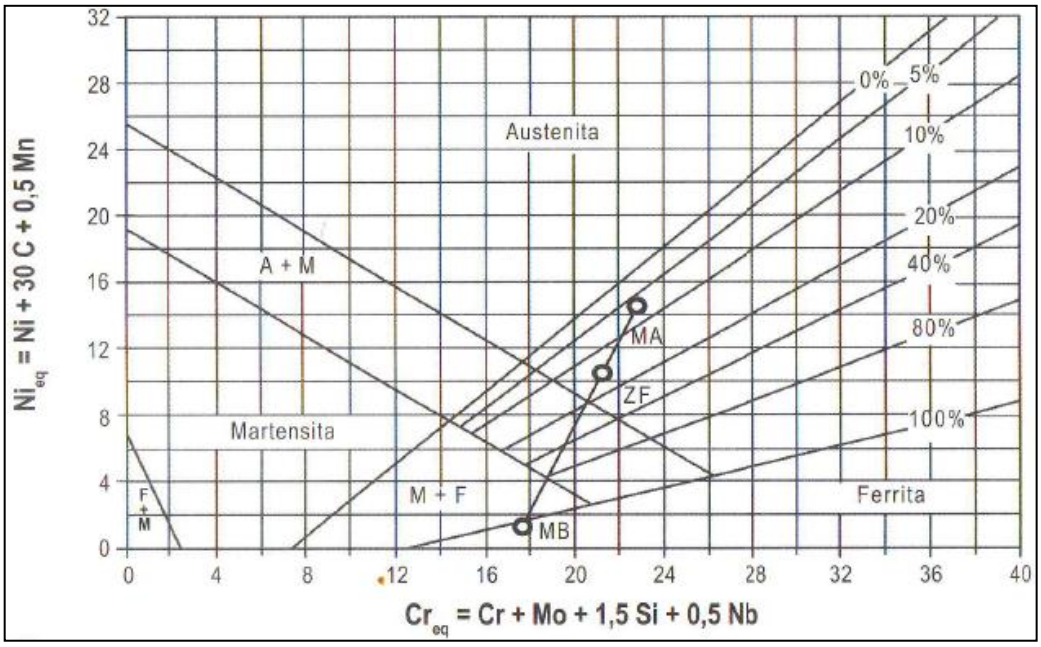


Figura II.17 – Diagrama de Schaeffler mostrando os pontos correspondentes ao metal base (MB), metal de adição (MA) e a solda (ZF). Fonte: MODENESI, 2001.

Em aços austeníticos Cromo – Níquel contendo ferrita, uma exposição a temperaturas entre cerca de 600 e 850 ºC por um período de tempo pode resultar na transformação parcial da ferrita em fase sigma. Esta transformação pode causar uma pequena fragilização em aços tipo 18% Cromo – 10% Níquel contendo menos de 10% de ferrita. Entretanto, aços com maior quantidade de ferrita ou aços com maior teor de cromo (por exemplo, do tipo 25%Cr – 20%Ni) podem sofrer uma substancial perda de ductilidade. (MODENESI, 2001)

Alguns dos fatores mais prováveis responsáveis pelo efeito benéfico da ferrita na redução da sensibilidade à formação de trincas de solidificação são:

- A maior solubilidade de impurezas prejudiciais (enxofre e fósforo) na ferrita causa uma menor segregação destes elementos quando a solidificação ocorre inicialmente com ferrita;
- Os contornos austenita-ferrita apresentam menor molhabilidade por filmes líquidos do que contornos ferrita-ferrita ou austenita-austenita, reduzindo o espalhamento do líquido ao final da solidificação;
- Os contornos austenita-ferrita são muito sinuosos, o que dificulta a propagação das trincas;

- A presença da ferrita resulta em uma maior quantidade de superfície interna devida às interfaces austenita-ferrita. Este aumento de superfície dispersa as impurezas que tendem a segregar nos contornos.

O aumento no percentual de ferrita na microestrutura da zona fundida resulta no aumento do limite de resistência devido a criação de contornos sinuosos, dificultando a propagação de trincas, onde ocorre o aumento de dureza do material, fazendo com que ocorra uma perda de ductilidade, tornando assim o material frágil.

A dureza reduz com o aumento do tamanho de grão austenítico. Uma vez que os contornos de grão atuam como barreira aos planos de escorregamento aumentando a resistência e, conseqüentemente, a dureza para amostras com menores tamanhos de grão. O aumento do limite de resistência do aço inoxidável pela maior presença de ferrita é detectada através da técnica de ultrassom, onde a velocidade ultra-sônica e a atenuação aumentam, quando o percentual de ferrita aumenta. (T.R.G. Kutty, 1987), (P. Li, 1992).

Uma vez que o limite de resistência de um aço depende de sua constante elástica, podemos relacionar a velocidade ultra-sônica com o limite de resistência deste material. Já no caso da atenuação sônica, a mesma é causada pela presença de defeitos e refletores como contornos de grão do material e pode, portanto ser relacionada ao limite de resistência do material uma vez que sofre o efeito do tamanho de grão e da presença de defeitos. (FONSECA, 2011).

CAPÍTULO III – METODOLOGIA EXPERIMENTAL

III.1 Material

O material utilizado para a confecção dos corpos de prova, no presente estudo, foi o aço inoxidável austenítico AISI 304L. Os corpos de prova soldados foram confeccionados a partir de uma um tubo de aço inox AISI 304/304L com diâmetro externo de 16" Schedule 30 (406,4 mm / 9,53 mm) com chanfro em V, ângulo do bisel de 35°, altura do nariz de 1 mm e abertura do chanfro de 4 mm, utilizado em gasodutos de gás natural comprimido, conforme figura III.1. A composição química do material segundo a literatura (MODENESI, 2001) e as propriedades mecânicas estão dispostas na tabela III.1 e III.3. Para a garantia dos percentuais químicos do aço do estudo foi executada uma análise química através de um espectrômetro de emissão ótica em um laboratório contratado, onde os valores encontrados para o estudo é citado na tabela III.2.

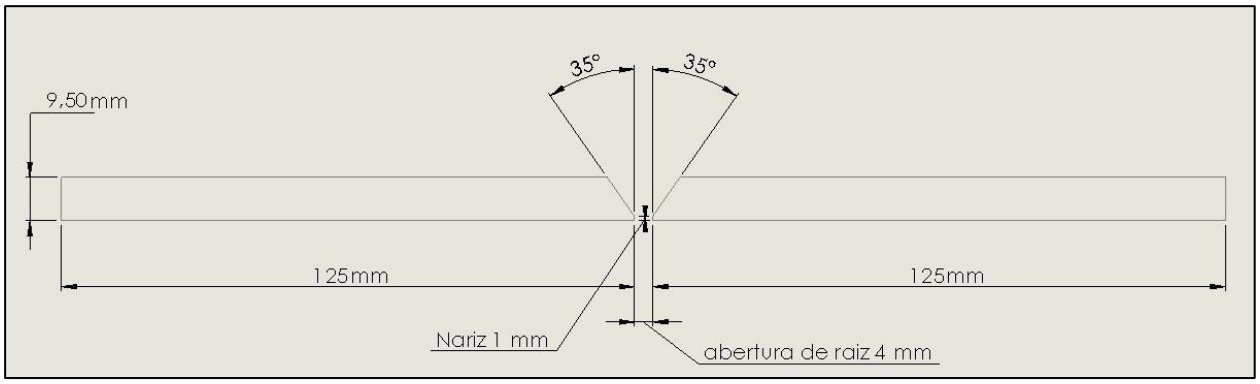


Figura III.1 – Detalhamento do dimensional da junta soldada.

Tabela III.1 – Composição química do aço AISI 304L. Fonte: MODENESI, 2001.

Carbono (%)	Cromo (%)	Níquel (%)	Manganês (%)	Silício (%)
0,03	18,0 – 20,0	8,0 – 11,0	2,0	1,0

Tabela III.2 – Composição química do metal base (aço AISI 304L) medida através de espectrometria de emissão ótica.

RESULTADOS OBTIDOS COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	
CARBONO	0,025
SILÍCIO	0,459
MANGANÊS	1,37
FÓSFORO	0,023
ENXOFRE	0,0029
CROMO	18,33
NÍQUEL	7,92
MOLIBDÊNIO	0,253
ALUMÍNIO	0,0051
COBRE	0,304
COBALTO	0,146
TITÂNIO	0,001
NIÓBIO	0,029
VANÁDIO	0,075
TUNGSTÊNIO	0,038
CHUMBO	0,003
BORO	0,0014
ESTANHO	0,004
ARSÊNIO	0,015
BISMUTO	0,0015
CÁLCIO	0,001
FERRO	71,0
NITROGÊNIO	0,063

Tabela III.3 – Propriedades mecânicas do aço AISI 304L. Fonte: MODENESI, 2001.

Tipo	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)	Dureza (Vickers)
Austenítico	290	580	55	248 HV

Para o estudo foram soldados 4 corpos de prova com o processo GTAW onde dois foram soldados com a vareta AWS A5.9 – ER308L de 2,4 mm de diâmetro e os outros dois com a vareta AWS A5.9 – ER316L de 2,4 mm diâmetro, sendo os dois consumíveis da marca Sandvick. Ambos possuem suas composições químicas e propriedades mecânicas listadas nas tabelas III.4.

O metal de adição ER308L (21%Cr e 10%Ni), usado neste estudo em forma de vareta de adição no processo GTAW, é o mais utilizado para a soldagem de juntas de composição

similar, em particular, do aço AISI 304. Apresenta as variações H, de maior teor de carbono, que é usado para garantir uma maior resistência mecânica a temperatura elevada; L, de baixo teor de carbono e que é usado para garantir uma melhor resistência à corrosão intergranular; Si, de maior teor de silício e que possibilita uma maior fluidez à poça de fusão e facilita a soldagem particularmente com o processo GMAW; Mo, com teor de molibdênio mais elevado, e, ainda, LSi e LMo. Sua composição química é constituída de um percentual de baixo carbono com a finalidade de impedir a precipitação de carbonetos de cromo no contorno de grão e um maior percentual de cromo que o metal de adição ER316L, fazendo deste mais alfagênico. A composição é descriminada na tabela III.4.

O metal de adição ER316L (19%Cr, 12,5%Ni e 2,5%Mo), usado para soldar o aço AISI 316 e similares. A presença de molibdênio (Mo) garante uma maior resistência à fluência a alta temperatura e à corrosão localizada em pontos (*piting*) em atmosfera contendo elementos halogênicos. Apresenta as variações H, L, Si e LSi. Sua composição química é constituída de um percentual de baixo carbono com a finalidade de impedir a precipitação de carbonetos de cromo no contorno de grão e um maior percentual de Níquel e menor percentual de Cromo que o metal de adição ER308L, fazendo deste mais gamagênico. A composição é descriminada na tabela III.4.

Tabela III.4 – Composição química (em %) dos metais de adição ER308L e ER316L. Fonte: MODENESI, 2001.

Classificação AWS	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N	Cu
ER308L	0,03	19,5 – 22,0	9,0 – 11,0	0,75	1,0 – 2,5	0,30 – 0,65	0,03	0,03	-	0,75
ER316L	0,03	18,0 – 20,0	11,0 – 14,0	2,0 – 3,0	1,0 – 2,5	0,30 – 0,65	0,03	0,03	-	0,75

O gás de proteção e de purga utilizado foi o argônio puro com composição da mistura de 99,9%.

III.2 Procedimento de Soldagem.

Na preparação dos quatro corpos de prova foi utilizada uma máquina de soldagem TIG da marca FRONIUS, modelo TRANSTIG 3000, para soldagem manual (figura III.2). A partir de valores de procedimentos de soldagem qualificados foram utilizados dois valores de corrente na soldagem, 90 e 120 amperes, polaridade inversa (CC-) e faixa de voltagem entre 10,5 a 12,0 Volts. Foi utilizado um bocal de número 7, utilizando-se uma vazão de 7 litros por minuto para o gás de proteção e 12 litros por minuto para o gás de purga. O eletrodo de tungstênio utilizado foi o eletrodo com 2% de Tório e diâmetro de 2,4 mm. As configurações dos corpos de prova foram dispostas na tabela III.5.



Figura III.4 – Máquina de soldagem utilizada na confecção dos corpos de prova.

Tabela III.5 – Parâmetros adotados para a confecção dos corpos de prova soldados.

	Processo	Metal de adição		Corrente de Soldagem	Gás de proteção e de purga
		Tipo	Diâmetro		
CP01	TIG	ER308L	2,4 mm	90 A	Argônio
CP02	TIG	ER308L	2,4 mm	120 A	
CP03	TIG	ER316L	2,4 mm	90 A	
CP04	TIG	ER316L	2,4 mm	120 A	



(a)



(b)



(c) **(d)**

Figura III.5 – **(a)** Confecção de dispositivo para purga. **(b)** Verificação de vazão de purga; **(c)** Ponteamento; **(d)** Soldagem dos corpos de prova.



Figura III.6 – Corpos de prova soldados seguindo aos parâmetros da tabela III.4.

III.3 Ensaios Metalográficos

III.3.1 Ensaio Micrográfico

Após a soldagem dos corpos de prova foram retiradas amostras para a execução dos ensaios de micrografia. Uma amostra de cada junta soldada foi retirada (figura III.7), onde foram cortadas através de uma cortadeira metalográfica da marca Panambra, modelo Pancut 100, passaram por uma sequência de lixas com as granulometrias: 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200. Após esta etapa de lixamento as amostras foram polidas com alumina de 1 µm . As amostras foram atacadas quimicamente com Água Régia (HCl + HNO_3 + H_2O), onde a dissolução usada foi composta de 10 ml de ácido nítrico, 20 ml de ácido clorídrico, 30 ml de água destilada.

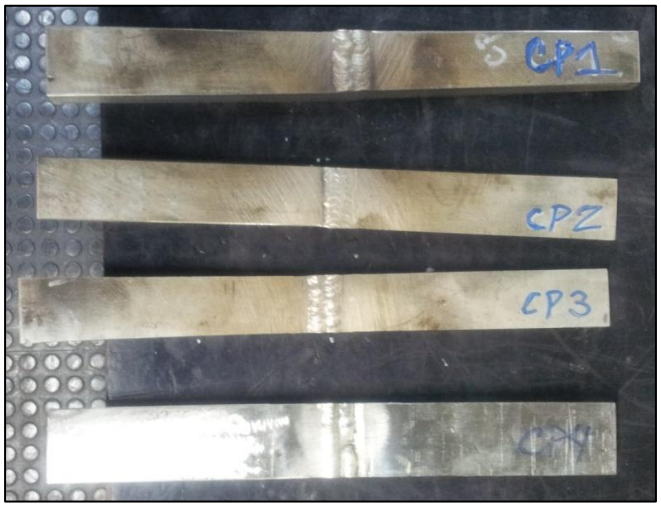


Figura III.7 – Amostras de cada corpo de prova retirada através de serra fita com refrigeração.



Figura III.8 – Amostras para análise micrográfica e dureza, referente aos corpos de prova 1, 2, 3 e 4.

Após preparação as amostras (figura III.8) foram analisadas quanto à textura e o balanço de fases das microestruturas resultantes através de um microscópio ótico de lente invertida da marca Olympus, modelo GX51 (figura III.9). Em cada amostra foram observadas as regiões da raiz, enchimento e acabamento da região soldada (figura III.10).



Figura III.9 – Microscópio ótico de lente invertida, marca Olympus, utilizado no projeto.

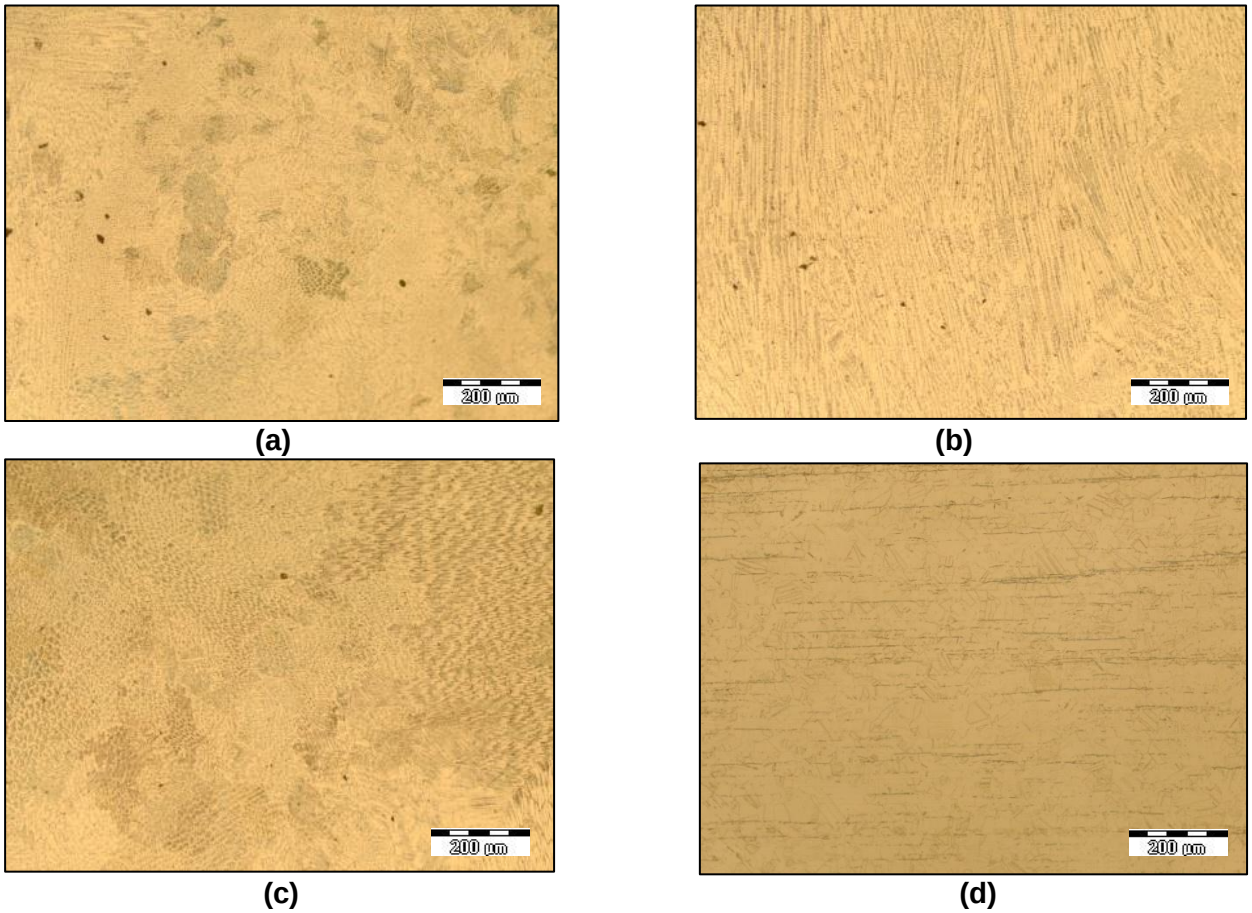


Figura III.10 – Micrografias do Corpo de prova 1 na região da **(a)** raiz; **(b)** enchimento; **(c)** acabamento; **(d)** metal base. Ataque água régia. Aumento 100X.

III.3.2 Análise de Percentual de Fases

Nas amostras de micrografia as regiões da raiz, enchimento e acabamento, foram analisadas quanto ao percentual em área das fases de austenita e ferrita (figura III.11). Para esta análise foi utilizado o mesmo microscópio de lente invertida da marca Olympus, modelo GX51, e também um software analisador de imagens, analySIS. Esta etapa tem o objetivo de correlacionar o percentual de fases em área com os parâmetros de ultrassom (velocidade e atenuação sônica).

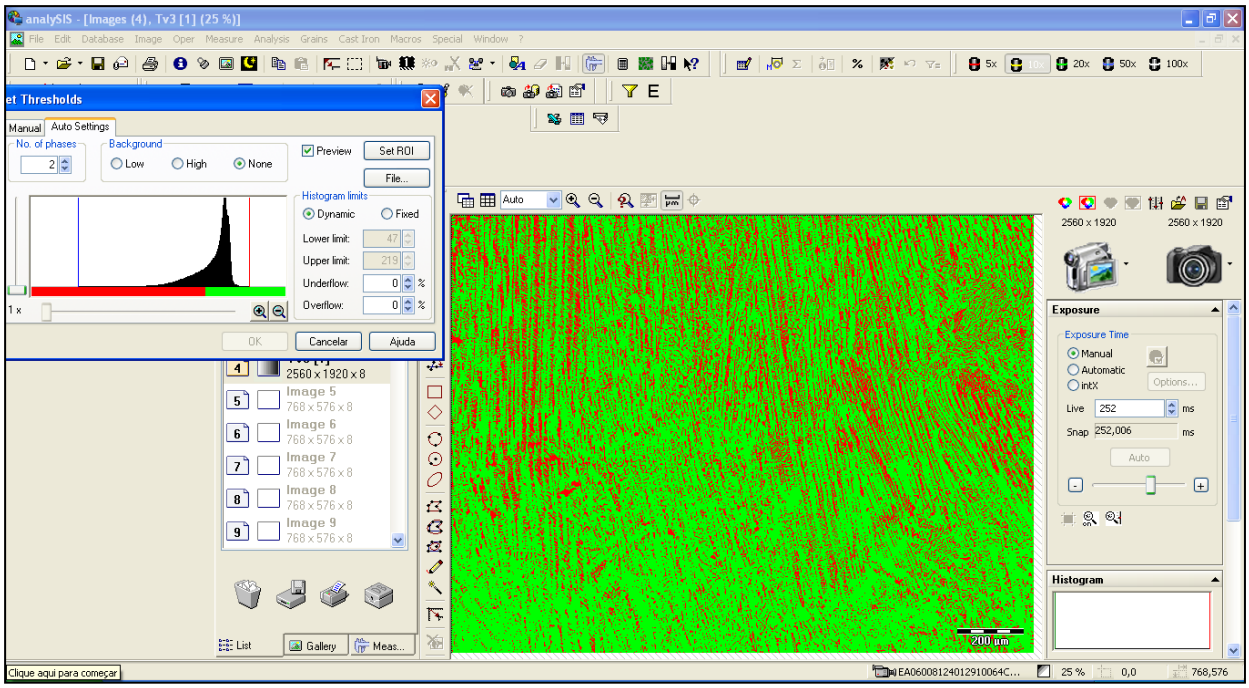


Figura III.11 – Análise de percentual em área de fases através de software para análise de imagens (analySIS).

III.3.3 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e EDS (*Energy Dispersive X-ray Detector*)

Com o objetivo de certificar a presença de ferrita e seu formato na microestrutura do metal base e da região soldada, as amostras foram submetidas a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise por EDS (*Energy Dispersive X-ray Detector*) (figuras III.12 e figura III.13). Para este ensaio foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura da marca Hitachi, modelo TM3000, e também o software Olympus Stream Motion v.1.6, da marca Olympus, para análise das imagens.



Figura III.12 – Microscópio Eletrônico de Varredura com EDS, utilizado no projeto.

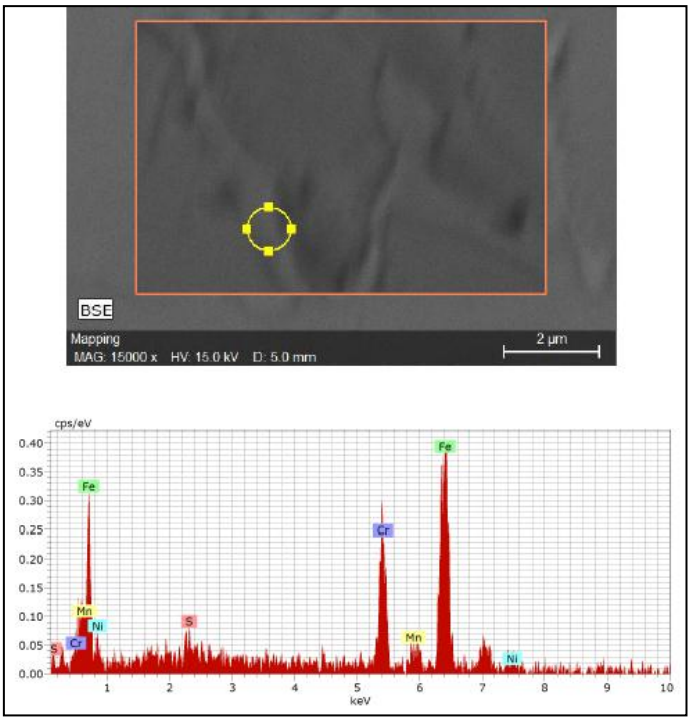


Figura III.13 – Análise por MEV e EDS para verificação da presença de ferrita na microestrutura.

III.3.4 Ensaio de Dureza Vickers

As quatro amostras foram submetidas ao ensaio de dureza Vickers com o objetivo de correlacionar estes valores com os parâmetros de ultrassom (velocidade e atenuação sônica). Para este ensaio foi utilizado um durômetro Vickers da marca Wolpert. No ensaio foi utilizada uma carga de 5 kgf (HV5,0) e um penetrador Vickers (pirâmide de diamante de 136º). As durezas foram tiradas na raiz, enchimento e acabamento de acordo com o croqui da figura III.15. Foram feitas um total de 18 medições por amostra, considerando uma média de 3 medidas em cada região das amostras.



Figura III.13 – Durômetro Vickers da marca Wolpert utilizado no projeto.



(a) (b)

Figura III.14 – Fotos durante ensaio de dureza vickers.

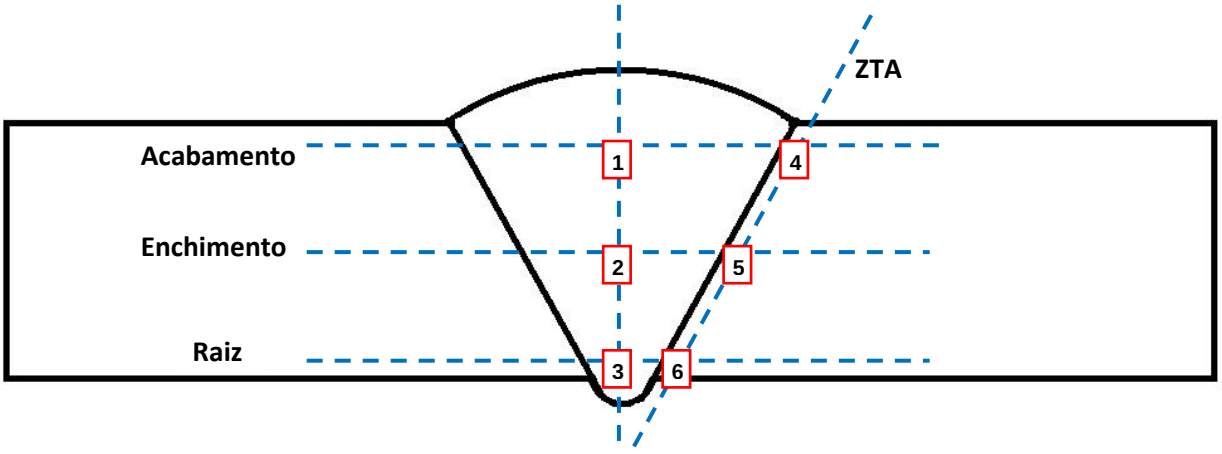
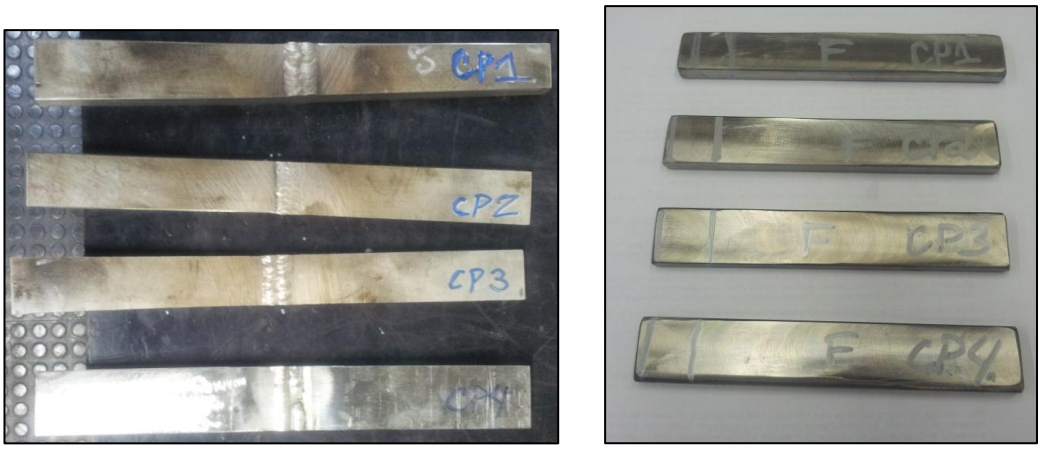


Figura III.15 – Croqui do mapeamento de dureza Vickers nos corpos de prova.

III.4 Inspeção por Ultrassom

III.4.1 Preparação das amostras de ultrassom

Nesta etapa foi retirada uma amostra de cada junta soldada e usinadas para a remoção do reforço da solda e redução da concavidade, a fim de evitar, durante inspeção, o espalhamento do feixe sônico (figura III.16). Após preparação da usinagem as amostras foram mensuradas através de um paquímetro para obter os valores de espessura na região soldada.



(a) **(b)**

Figura III.16 – Amostras **(a)** retiradas da junta soldada; **(b)** usinadas na fresadora para remoção do reforço.

III.4.2 Inspeção por Ultrassom

Esta etapa teve como objetivo determinar a velocidade e atenuação sônica em cada amostra preparada nas duas técnicas, ultrassom convencional e *phased array*. A obtenção destes dois parâmetros vai permitir a elaboração de uma correlação com os ensaios realizados com a microestrutura. A correlação vai permitir demonstrar que a partir do conhecimento da microestrutura resultante, ou seja, após o desenvolvimento de um procedimento de soldagem, parâmetros de inspeção podem ser ajustados.

Nesta etapa foram utilizados os equipamentos de ultrassom e os cabeçotes descritos na tabela III.6.

Tabela III.6 – Equipamentos utilizados na inspeção.

Tipo	Marca/Fabricante	Modelo	Informação	
Aparelho de Ultrassom Convencional	Parametrics/Olympus	EPOCH LT		Figura III.17
Transdutor	Krautkramer	MSEB4H	4 MHz	Figura III.18
Aparelho de Ultrassom *Phased Array*	Olympus	OMNISCAN MX 32 PA	32/128 elementos	Figura III.19
Transdutor	Olympus	5L32-A11	32 elementos / 5 MHz	Figura III.20
Sapata	Olympus	SA11-0L	0 graus	Figura III.21
Bloco de Calibração	Intermetro	V1	Material AISI 304L	Figura III.22
Bloco de Calibração	Intermetro	V2	Material AISI 304L	Figura III.23
Bloco de Calibração	Intermetro	Curvo – Asme V	Material AISI 304L	Figura III.24

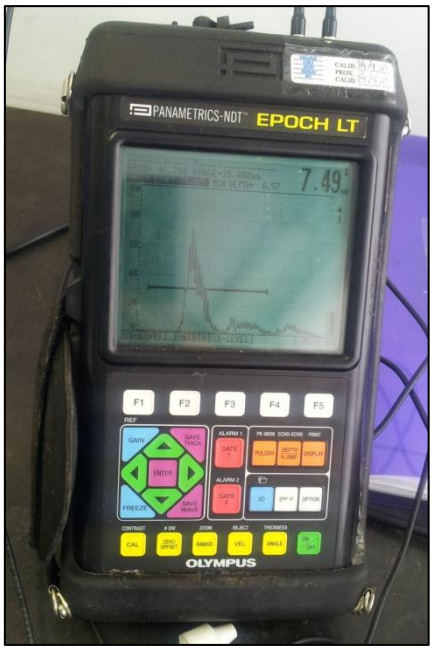


Figura III.17 – Aparelho de Ultrassom Convencional utilizado no projeto.



Figura III.18 – Transdutor MSEB4H Krautkramer, utilizado no projeto.



Figura III.19 – Aparelho de Ultrassom *Phased Array Omniscan* MX 32/128, utilizado no projeto.

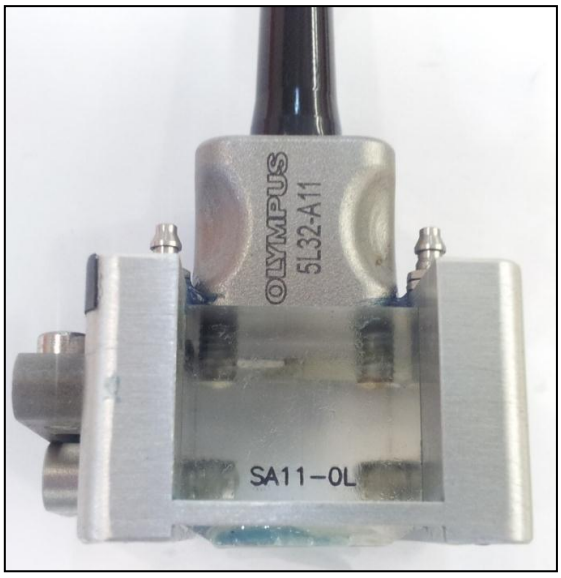


Figura III.20 – Transdutor 5L32-A11 de 32 elementos e Sapata SA11-0L.

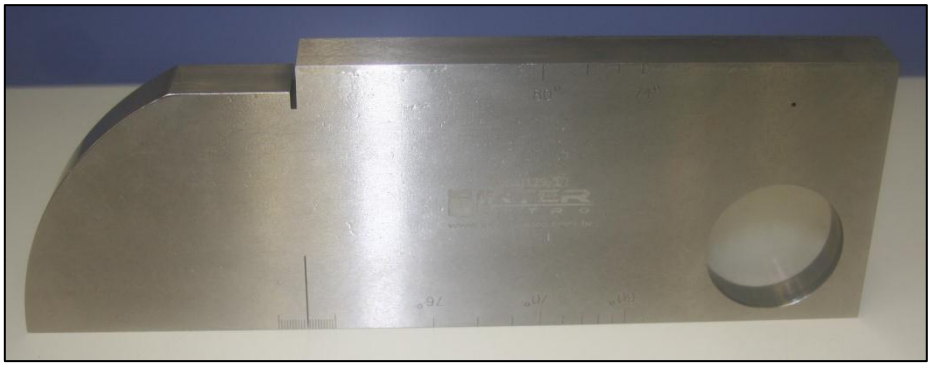


Figura III.21 – Bloco de calibração V1 em aço inoxidável AISI 304L.

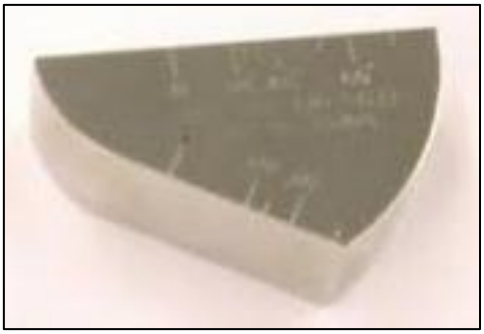


Figura III.22 – Bloco de calibração V2 em aço inoxidável AISI 304L.

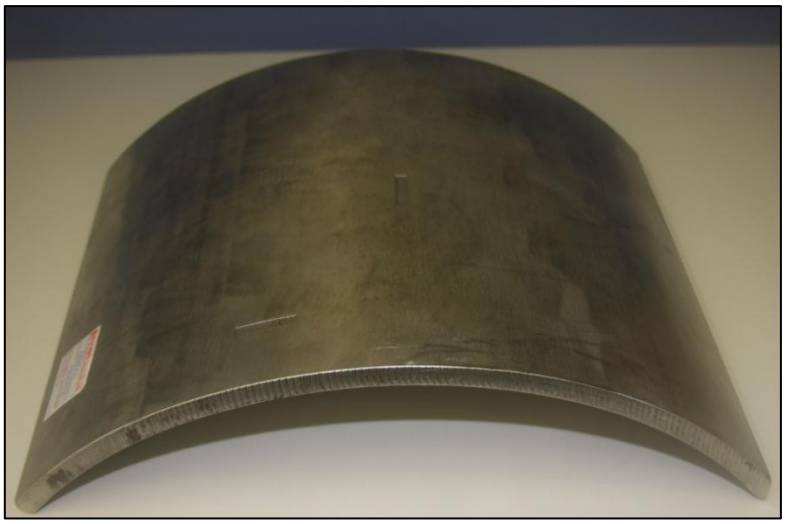


Figura III.23 – Bloco de calibração curvo segundo a norma ASME V em aço inoxidável AISI 304L.

O bloco V1 foi utilizado para calibrar a sensibilidade do aparelho através da reflexão do furo de 1,5 mm. O bloco V2 foi utilizado para calibrar a velocidade sônica padrão. O bloco curvo foi utilizado para analisar a variação do dimensionamento do entalhe ao variar a velocidade.

O transdutor MSEB4H é um transdutor com duplo cristal, com frequência de 4MHz e de ondas longitudinais.

O transdutor 5L32-A11 pode ser usado para ondas longitudinais e transversais, pois a sapata define o ângulo de incidência. Este é um transdutor linear de 32 elementos.

III.4.3 – Configuração dos Parâmetros de Inspeção – ESBEAM TOOLS

Antes da execução da inspeção foi executada uma simulação dos ensaios para avaliar a eficiência dos mesmos através do *software ESBEAM TOOLS* Versão 4 (figura III.24). Neste software foi possível avaliar o comportamento do feixe sônico no interior da região da solda com o ajuste prévio dos parâmetros como velocidade de inspeção, número de elementos, tipo de varredura, faixas dos ângulos entre outros parâmetros.

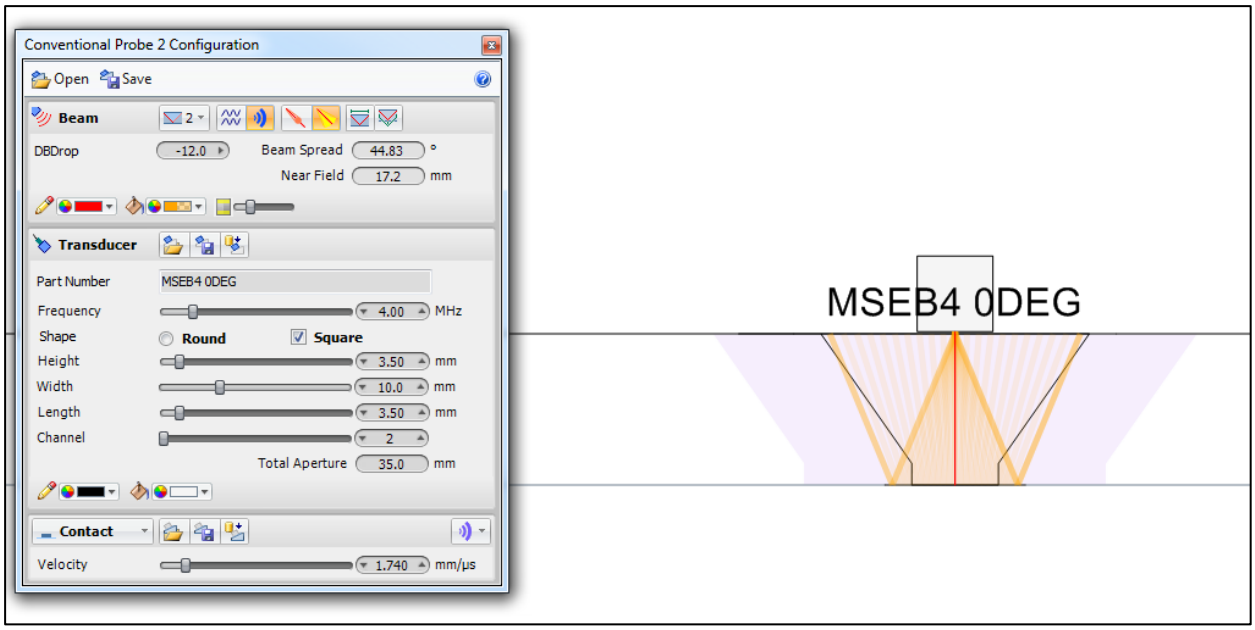


Figura III.24 – Software ESBEAM TOOLS utilizado para a configuração do feixe sônico.

III.4.4 Medições de Velocidade Sônica e Atenuação.

As medições de velocidade sônica e atenuação (figura III.25) foram executadas em etapas que são descritas abaixo. A aquisição destes dados foi importante para a correlação com os valores medidos nos ensaios. Nas duas técnicas utilizou-se do mesmo procedimento.

Para a medição da velocidade sônica:

- Calibração do aparelho de acordo com o bloco calibração V1 quanto a sensibilidade de detectar o furo, ajustando o ganho do aparelho e dois ecos na tela (primeiro eco na espessura conhecida da peça e o segundo o valor ao dobro). Através da medida de espessura do bloco de calibração V2 (25 mm), verificou-se a velocidade que convergiu na espessura do bloco, Partiu-se da velocidade nominal para uma onda longitudinal no aço inoxidável austenítico de 5800 m/s para a velocidade coincidente a espessura do bloco.
- As espessuras das amostras foram dimensionadas com um paquímetro nas regiões soldadas. Localizando o transdutor na região soldada, ajustou-se a velocidade até a convergência das espessuras, mantendo o mesmo ganho em decibel mensurado no padrão.

Para a medição da atenuação:

- Após a calibração do aparelho de acordo com o bloco padrão V1 quanto a sensibilidade de detecção do furo e a respectiva velocidade sônica ao longo de uma espessura conhecida, o transdutor ao ser localizado na região do metal base (a 80% da tela) e ser

deslocado para a região soldada observa-se a queda na amplitude do sinal. A diferença entre o valor do ganho a 80% da tela no metal base, com o valor do ganho necessário para chegar a 80% da tela na região soldada, é o valor da atenuação.



(a) **(b)**

Figura III.25 – **(a)** Medição no aparelho de ultrassom convencional; **(b)** Medição no aparelho de ultrassom *phased array*.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de investigar o comportamento do feixe sônico em juntas soldadas de aço inoxidável austenítico AISI 304L e sua correlação com a microestrutura da região soldada, este trabalho propôs a geração de quatro microestruturas diferentes através do uso de dois consumíveis ER308L e ER316L e duas correntes de soldagem 90 A e 120 A, para a soldagem pelo processo GTAW (TIG). Com base na característica das juntas soldadas de aço inoxidável apresentar o efeito de atenuação sônica, refração, espalhamento e absorção (ANDREUCCI, 2003), (COSTA, 2011), para observar as mudanças microestruturais e correlacioná-las com a dureza e percentual em área de ferrita, medidas de velocidade sônica e atenuação foram avaliadas nas técnicas de ultrassom convencional e *phased array*.

IV.1 Efeito dos Parâmetros de Soldagem

A soldagem dos corpos de prova permitiu gerar quatro microestruturas diferentes, o que permitiu avaliar a frente a propagação do som nas mesmas. Os corpos de prova CP1 e CP2 usaram o metal de adição ER308L e correntes de soldagem de 90 A e 120 A, respectivamente. Os corpos de prova 3 e 4 usaram o metal de adição ER316L e correntes de soldagem de 90 A e 120 A, respectivamente.

Os dois valores de correntes de soldagem contribuíram para a alteração das microestruturas, isso porque a transformação completa da ferrita somente seria possível se o aço permanecesse por um longo tempo a altas temperaturas, nas quais a transformação ocorre mais rapidamente. O maior valor de corrente fornece maior aporte de calor na solda, e considerando que todos os corpos de prova foram resfriados ao ar, os corpos de prova soldados com maior valor de corrente diluíram mais a ferrita em sua microestrutura, tornando a textura mais refinada. Este informação é ratificada nos resultados dos ensaios micrográficos.

O metais de adição ER308L e ER316L possuem em sua composição química um valor de percentual de carbono de 0,03%, um percentual de baixo carbono, com a finalidade de impedir a precipitação de carbonetos de cromo no contorno de grão, garantindo uma melhor resistência a corrosão intergranular. O percentual de cromo e níquel no metal de adição ER308L são de 21% e 10%, respectivamente, já no ER316L são de 19% e 12,5%, respectivamente. A avaliação prévia dos percentuais através do diagrama de Schaeffler, permitiu afirmar que o metal de adição ER308L é mais alfagênico (formador de fase ferrita) que o ER316L, pois o valor do cromo sendo maior e o valor do níquel sendo menor favorece a formação de fase ferrita no material.

Os metais de adição também contribuíram para a alteração das microestruturas, pois observou-se que os corpos de prova soldados com o metal de adição ER316L, possuíram uma

microestrutura com menor quantidade de ferrita, pois este metal de adição tem uma característica mais gamagênica que o ER308L.

IV.1.1 Diagrama de Schaeffler

Com o auxílio do diagrama de Schaeffler (figura II.14) foi possível avaliar previamente um valor teórico do percentual de ferrita na região soldada, que através do cálculo do valor do cromo equivalente e do níquel equivalente, constatou-se que a região soldada com o metal de adição ER308L forma um maior percentual ferrita delta que o metal de adição ER316L.

- Metal Base AISI 304L:

  $Cr_{eq} = Cr + Mo + 1,5Si + 0,5Nb = 18,33 + 0,253 + 1,5 \times 0,459 + 0,5 \times 0,029$

  $Cr_{eq} = 19,286$

  $Ni_{eq} = Ni + 30C + 0,5Mn = 7,92 + 30 \times 0,025 + 0,5 \times 1,37$

  $Ni_{eq} = 9,355$

- Metal de Adição ER308L:

  $Cr_{eq} = Cr + Mo + 1,5Si + 0,5Nb = 21,0 + 0,75 + 1,5 \times 0,5 + 0,5 \times 0,0$

  $Cr_{eq} = 22,5$

  $Ni_{eq} = Ni + 30C + 0,5Mn = 10,0 + 30 \times 0,03 + 0,5 \times 1,75$

  $Ni_{eq} = 11,775$

- Metal de Adição ER316L:

  $Cr_{eq} = Cr + Mo + 1,5Si + 0,5Nb = 19,0 + 2,5 + 1,5 \times 0,5 + 0,5 \times 0,0$

  $Cr_{eq} = 22,25$

  $Ni_{eq} = Ni + 30C + 0,5Mn = 12,5 + 30 \times 0,03 + 0,5 \times 1,75$

  $Ni_{eq} = 14,275$

Para uma região soldada com metal de solda com diluição de 30%:

- AISI 304L + ER308L => cerca de 15% de ferrita delta na microestrutura. (Figura IV.1)
- AISI 304L + ER316L => cerca de 7,5% de ferrita delta na microestrutura. (Figura IV.2)

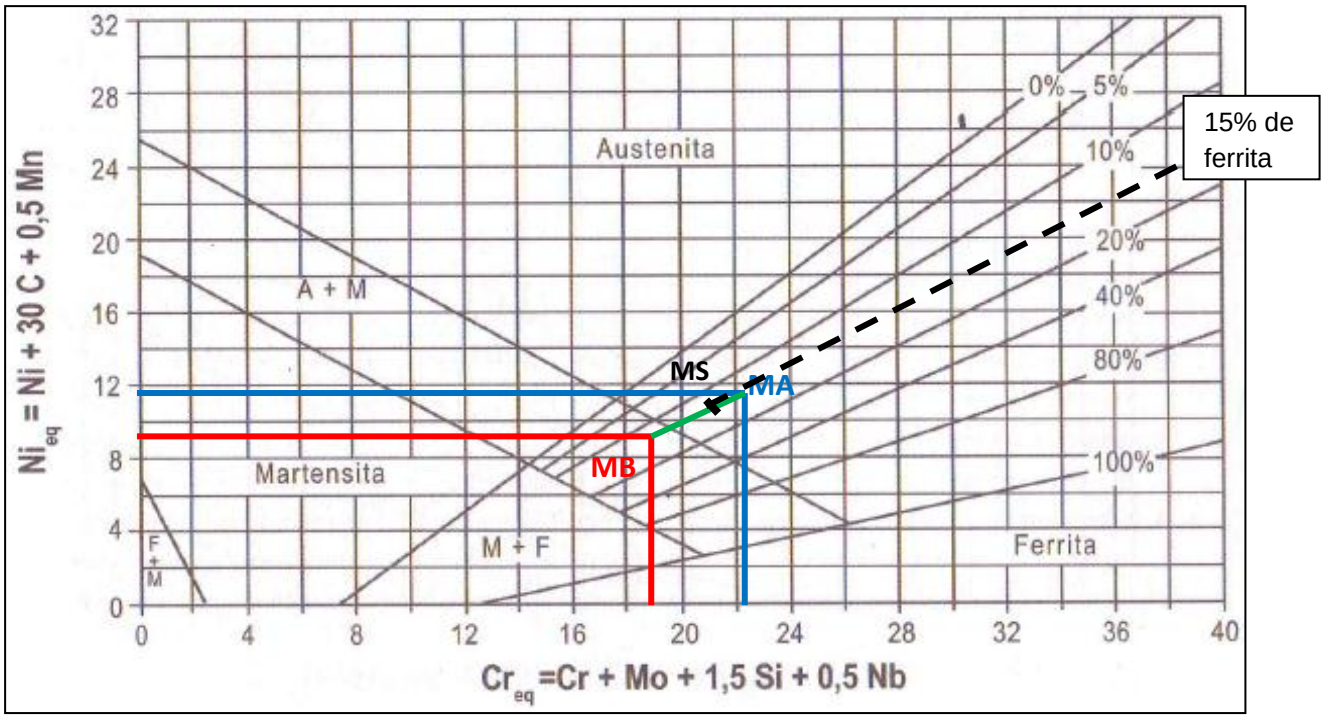


Figura IV.1 – Diagrama de Schaeffler, percentual de 15% de ferrita calculado para uma soldagem com metal de adição ER308L. MB, metal base; MA, metal de adição; MS, metal de solda.

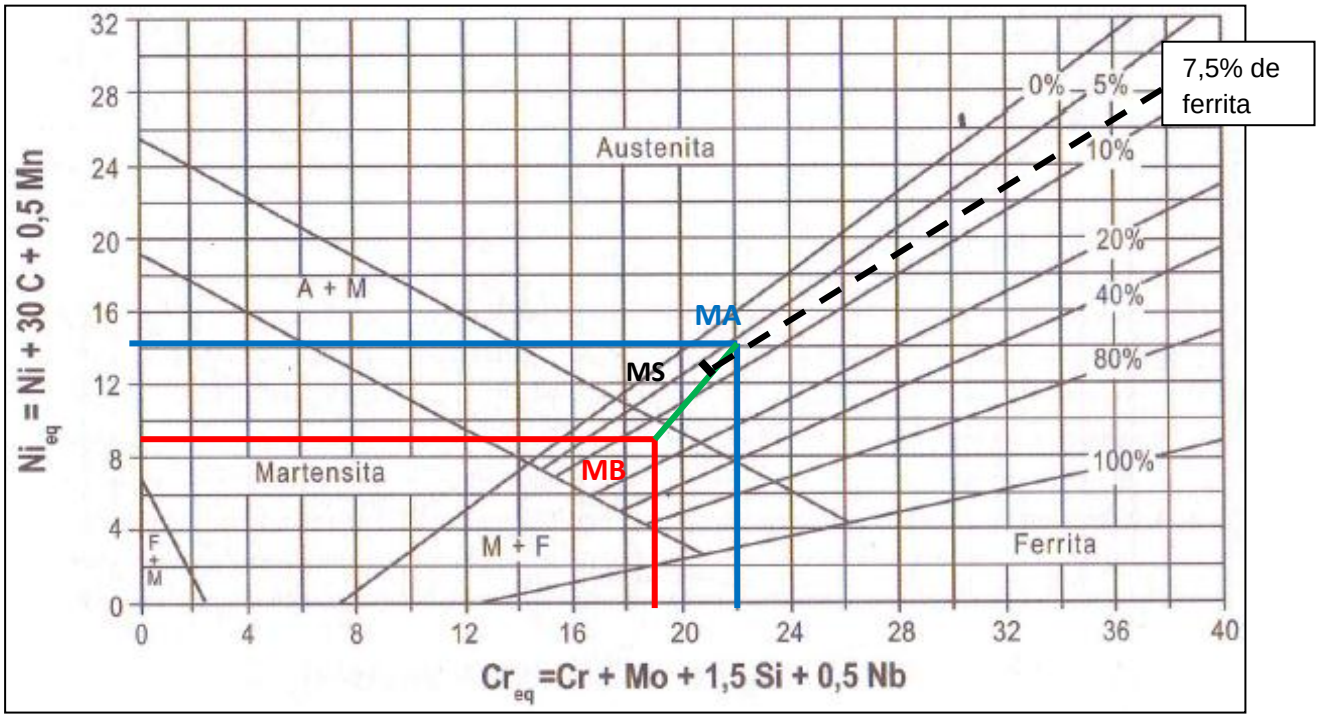


Figura IV.2 – Diagrama de Schaeffler, percentual de 7,5% de ferrita calculado para uma soldagem com metal de adição ER316L. MB, metal base; MA, metal de adição; MS, metal de solda.

IV.1.2 Ensaio Micrográfico

No ensaio micrográfico foi possível determinar a forma de solidificação da microestrutura, que nas quatro amostras foram observados dois tipos de microestruturas (figuras IV.4, IV.5, IV.6, IV.7).

Uma das microestruturas é resultado de uma solidificação em austenita primária com formação de ferrita em reação eutética ao final da solidificação e localizada em contornos de grão ou de dendritas. A outra microestrutura observada é o resultado de uma solidificação em ferrita primária com formação de austenita tanto nas etapas finais desta, como já no estado sólido (ao final da solidificação).

A ferrita remanescente se localiza ao longo do centro das dendritas. A transformação completa da ferrita somente seria possível se o aço permanecesse por um longo tempo a altas temperaturas, nas quais a transformação ocorre mais rapidamente, o que demonstrou nas micrografias que os corpos de prova com maior valor de corrente diluíram mais a ferrita.

O metal base possui uma microestrutura de matriz austenítica com teor de ± 95,95% e ferrita com 3,22% e maclas de recozimento. A precipitação de ferrita deve-se a deformação sofrida no processo de fabricação onde apresentou livre de precipitação de carbonetos nos contornos de grãos, e a zona central se caracterizou por linhas de segregação e linhas de escorregamento (figura IV.8).

A zona de fusão das amostras caracterizou-se por possuir linhas de fusão com dissolução da ferrita e ausência de precipitação de carbonetos nesta região (figura IV.9, IV.10, IV.11, IV.12).

As imagens retiradas foram orientadas através de um croqui de localização, mostrado na figura IV.3.

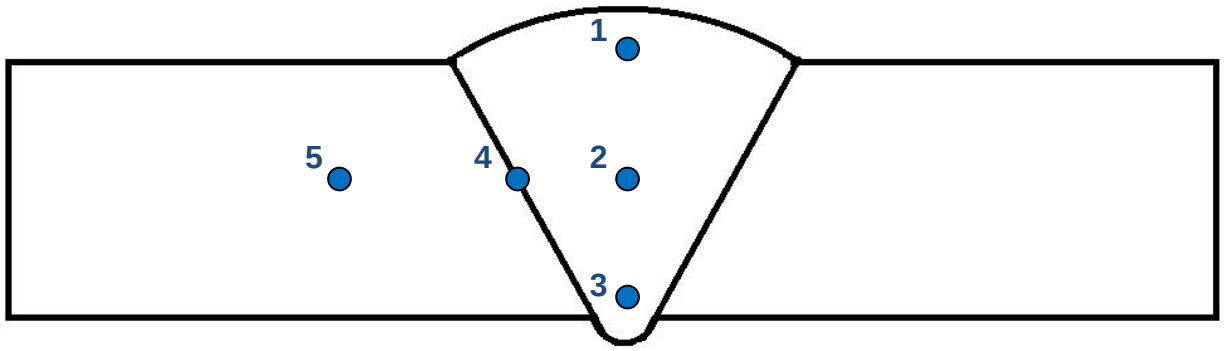
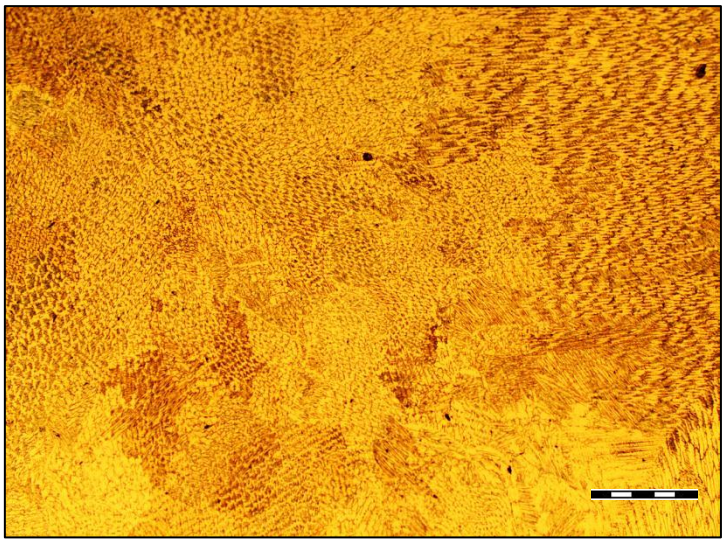
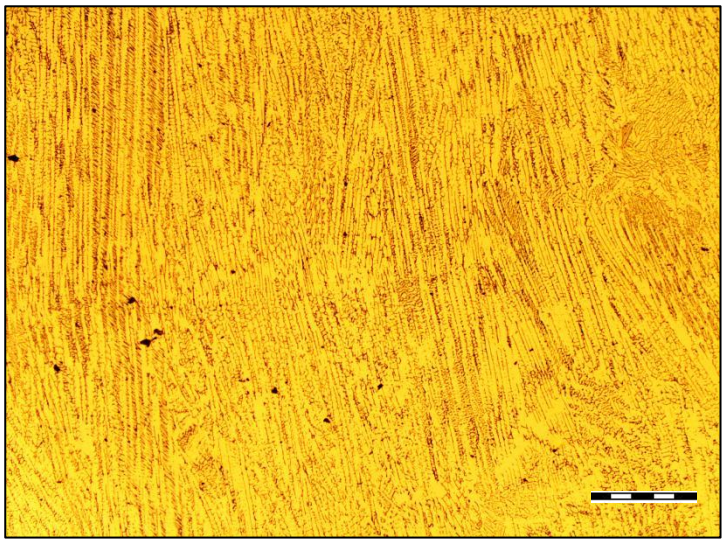


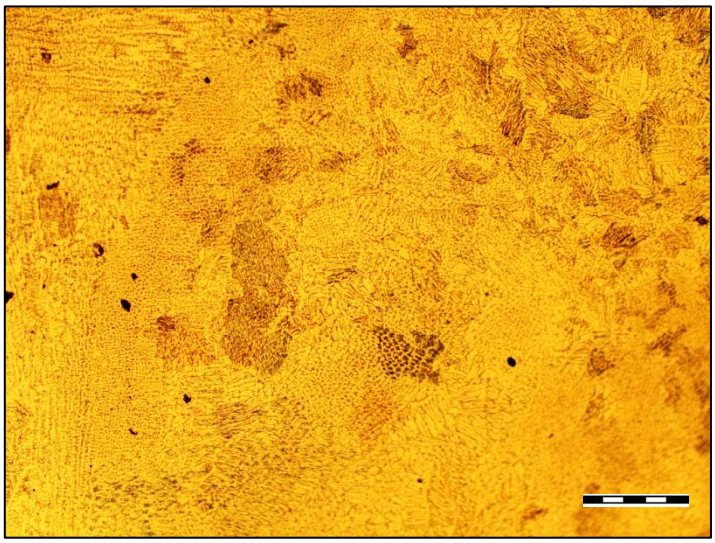
Figura IV.3 – Croqui com as regiões das micrografias nos corpos de prova. (1) acabamento; (2) enchimento; (3) raiz; (4) zona termicamente afetada, ZTA; (5) metal base.



(a)

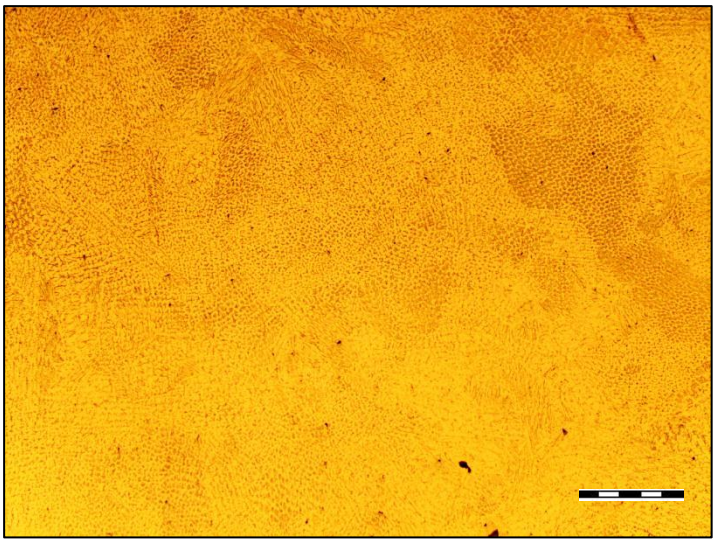


(b)

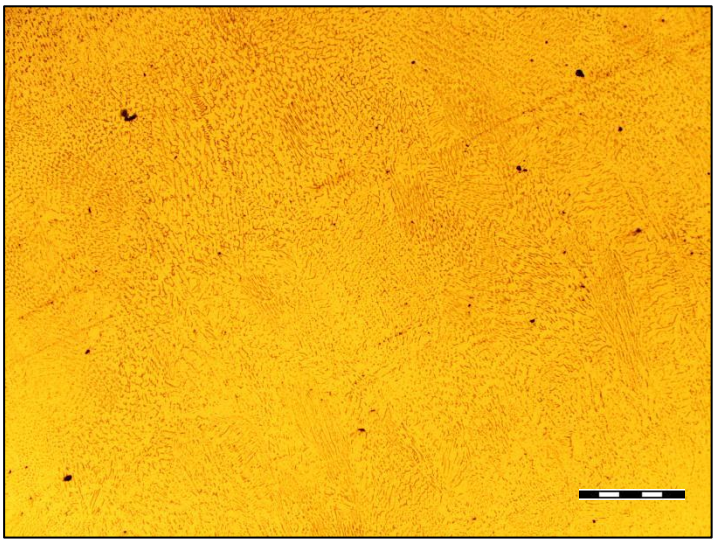


(c)

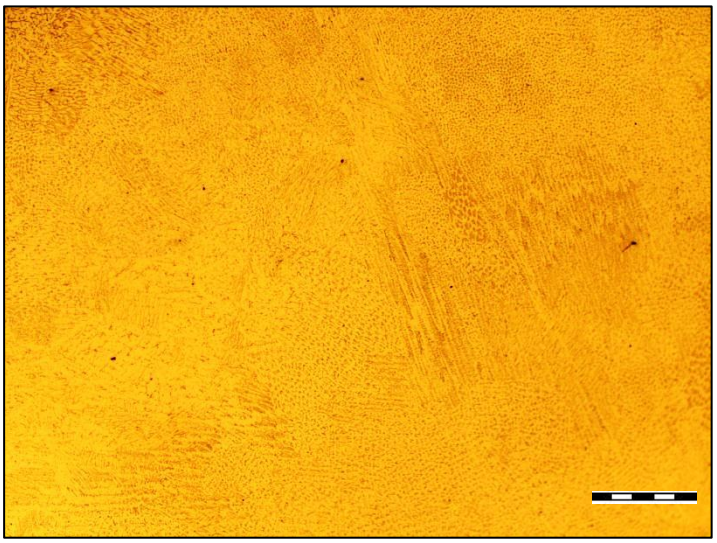
Figura IV.4 – Microestruturas do corpo de prova 1 nas regiões: (a) acabamento; (b) enchimento; (c) raiz. Aumento 100X. Ataque Água Régia.



(a)

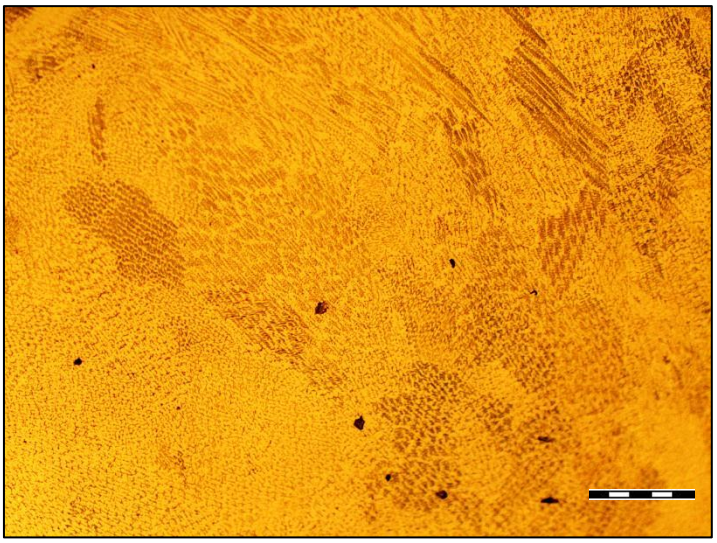


(b)

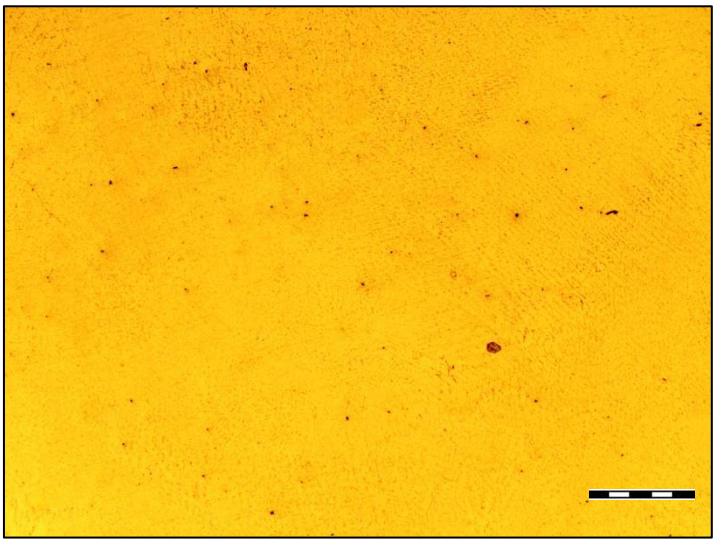


(c)

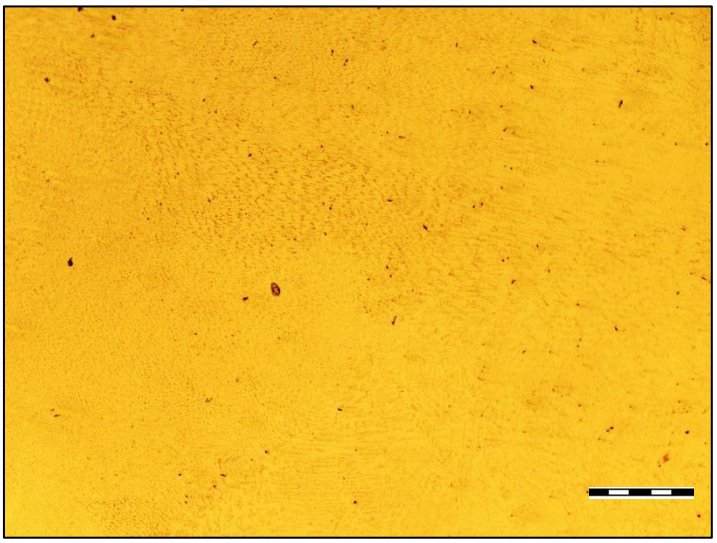
Figura IV.5 - Microestruturas do corpo de prova 2 nas regiões: (a) acabamento; (b) enchimento; (c) raiz. Aumento 100X. Ataque Água Régia.



(a)

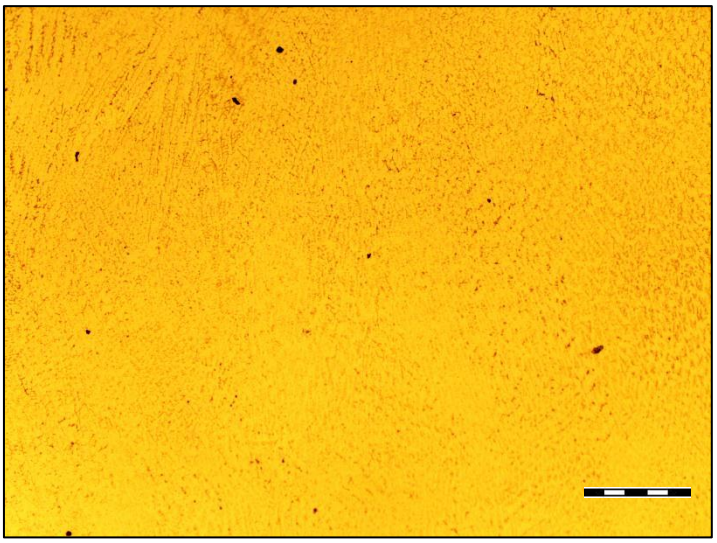


(b)

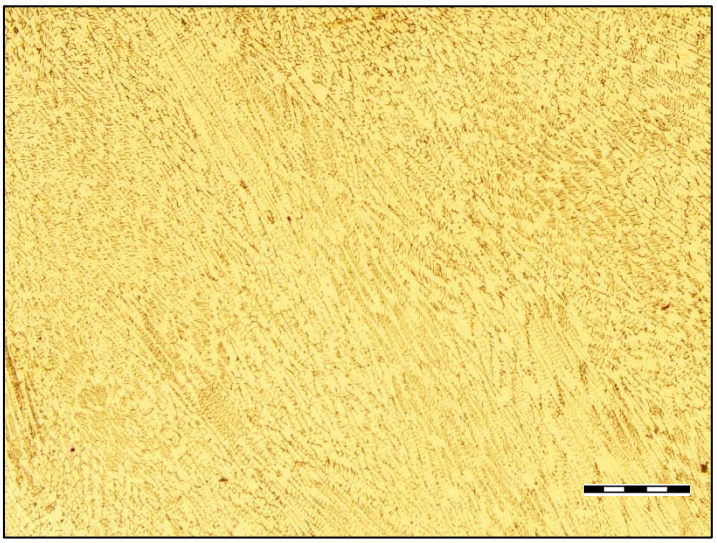


(c)

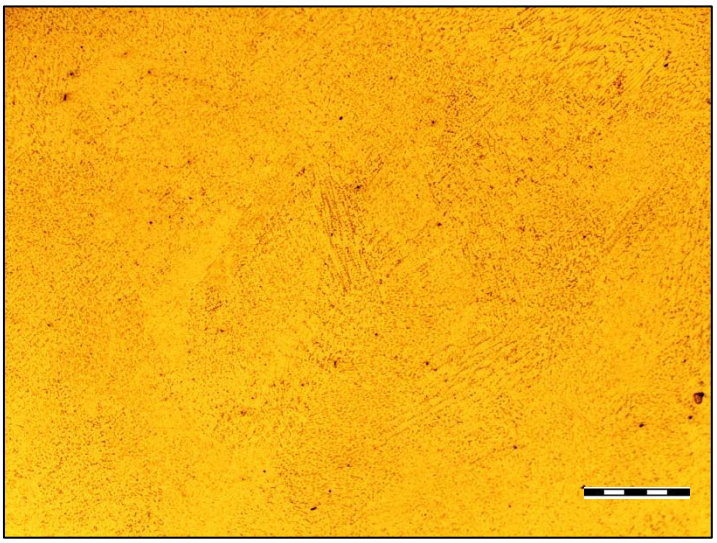
Figura IV.6 - Microestruturas do corpo de prova 3 nas regiões: (a) acabamento; (b) enchimento; (c) raiz. Aumento 100X. Ataque Água Régia.



(a)

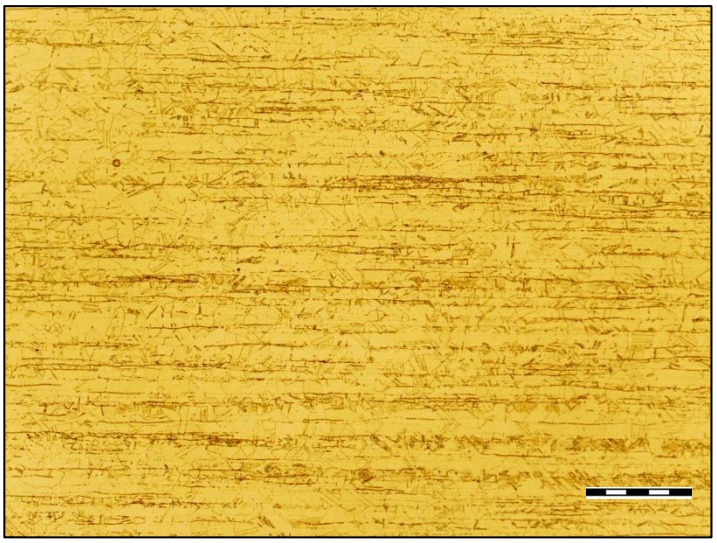


(b)

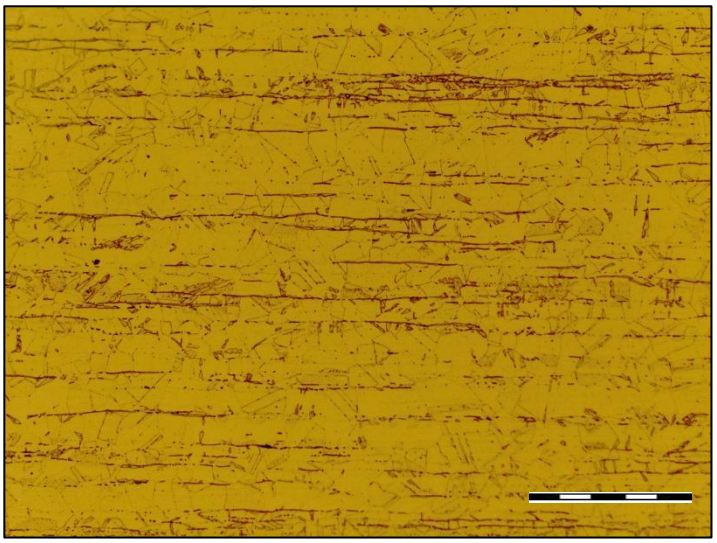


(c)

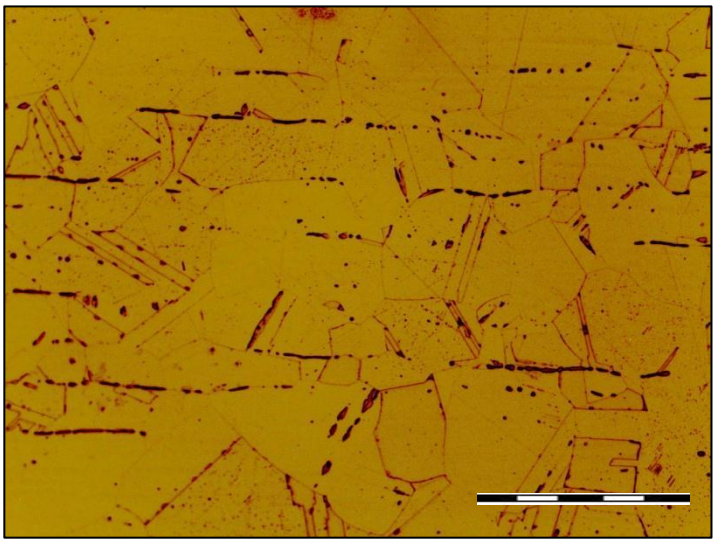
Figura IV.7 - Microestruturas do corpo de prova 4 nas regiões: (a) acabamento; (b) enchimento; (c) raiz. Aumento 100X. Ataque Água Régia.



(a)

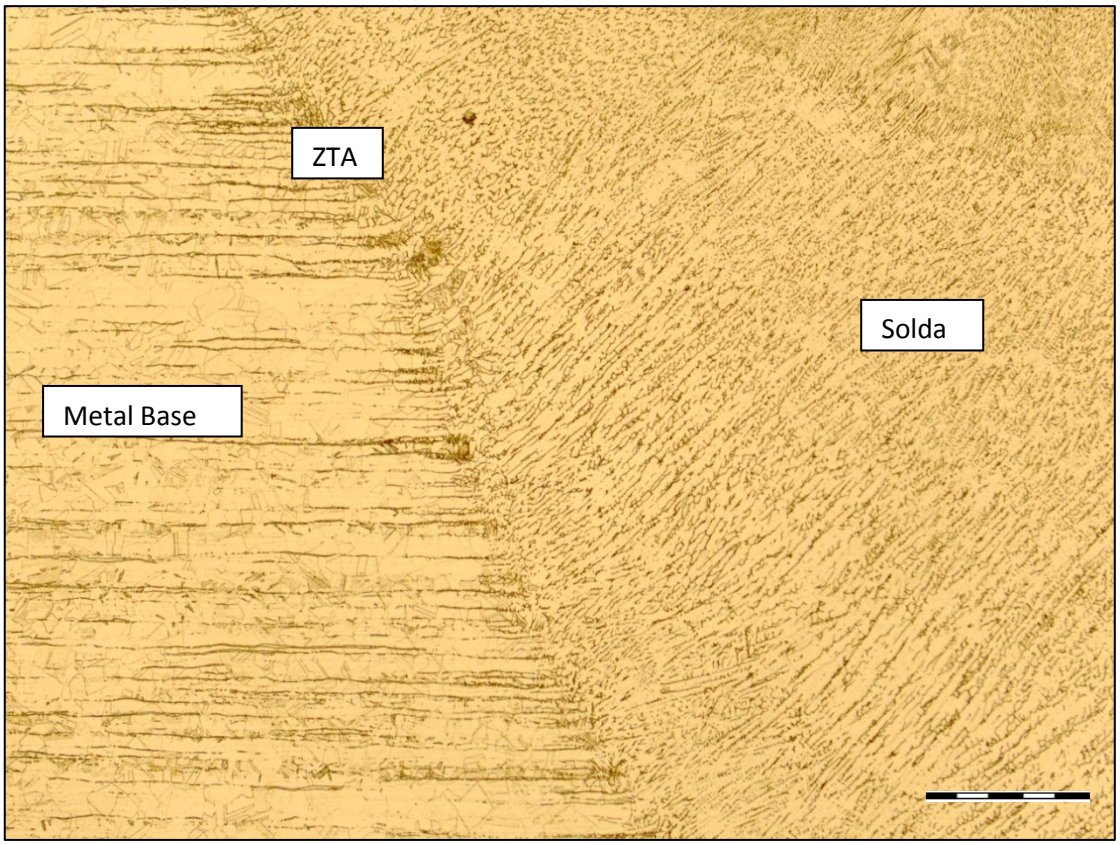


(b)

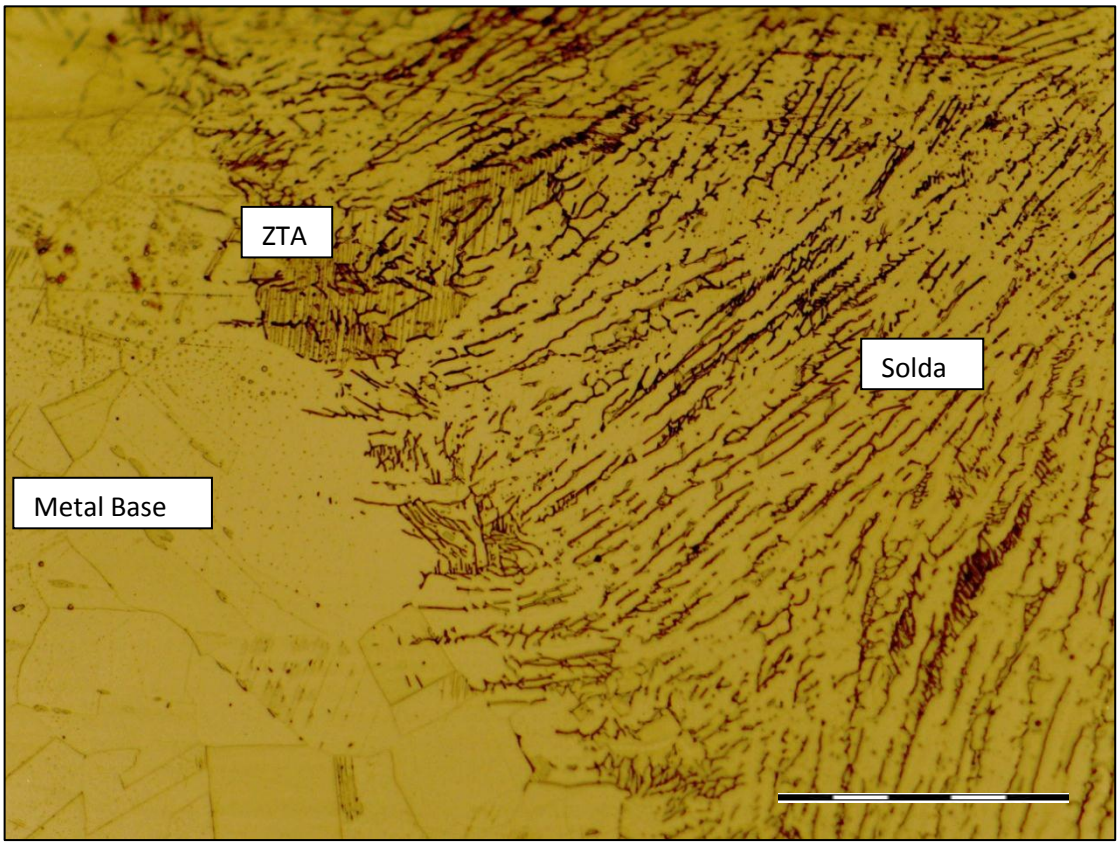


(c)

Figura IV.8 – Metal base aço AISI 304L. Matriz austenítica com Ferrita alongada, grãos maclados e alguns pontos de linhas de deformação. Ataque: Água régia Aumento: (a) 100X; (b) 200X; (c) 500X.

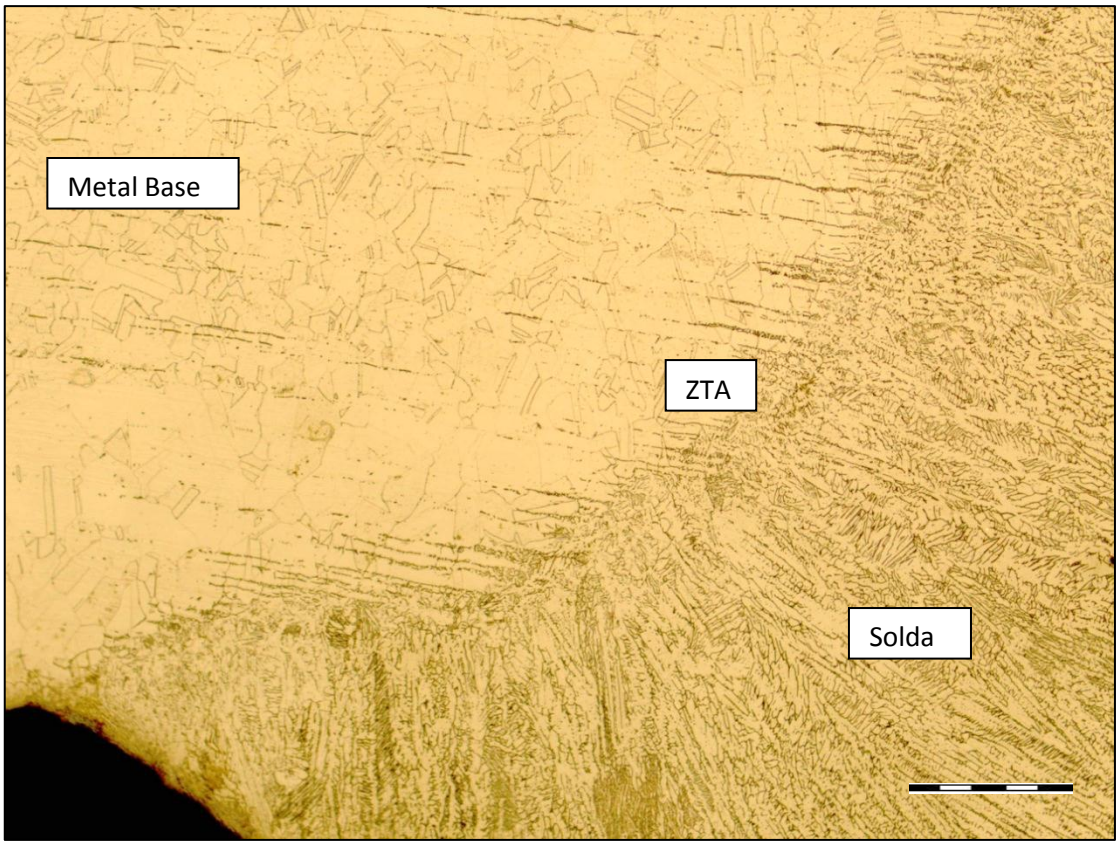


(a)

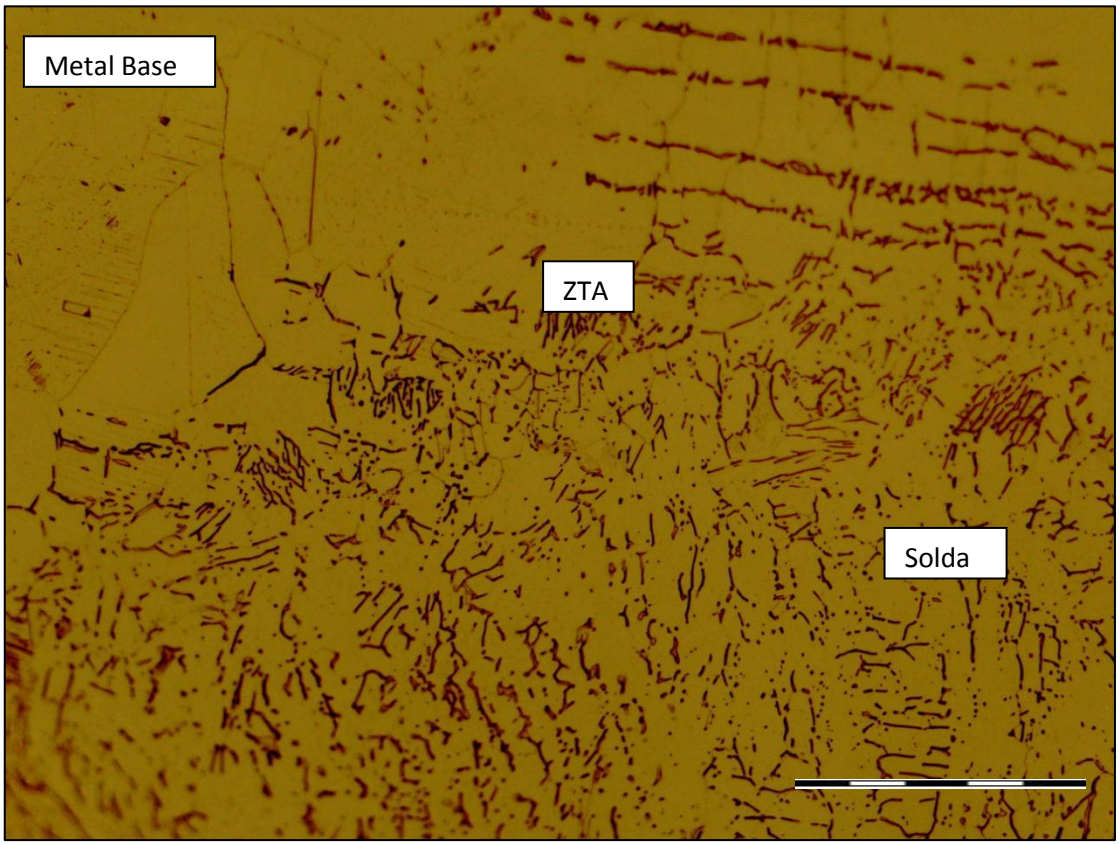


(b)

Figura IV.9 – Micrografia da ZTA do Corpo de Prova 1. Ataque: Água Régia. Aumentos: (a) 100X; (b) 500X.

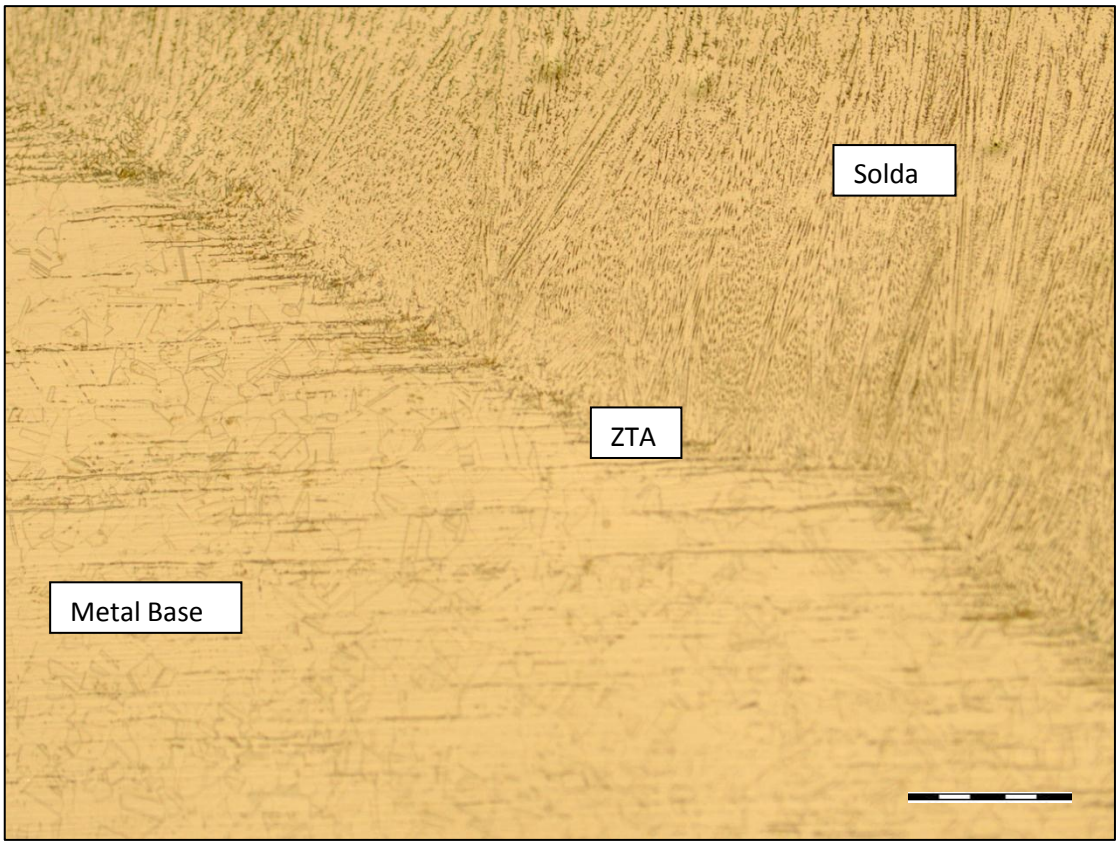


(a)

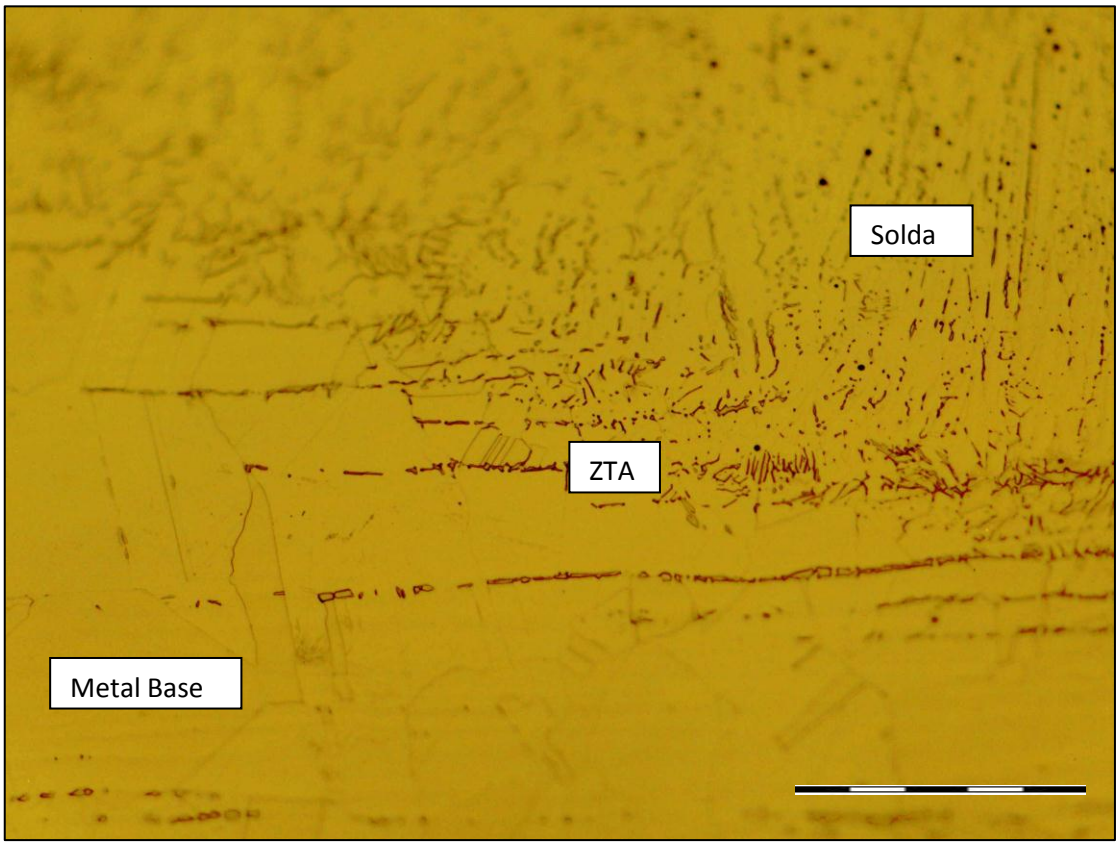


(b)

Figura IV.10 – Micrografia da ZTA do Corpo de Prova 2. Ataque: Água Régia. Aumentos: (a) 100X; (b) 500X.

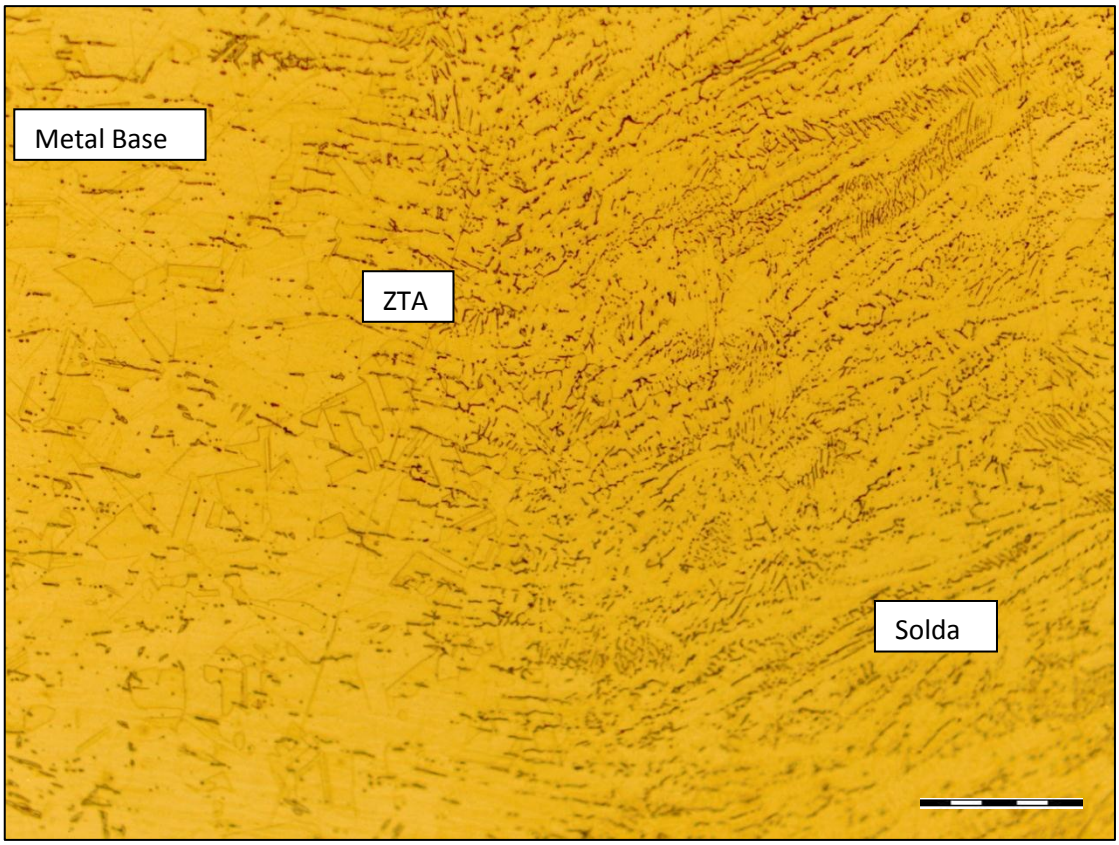


(a)

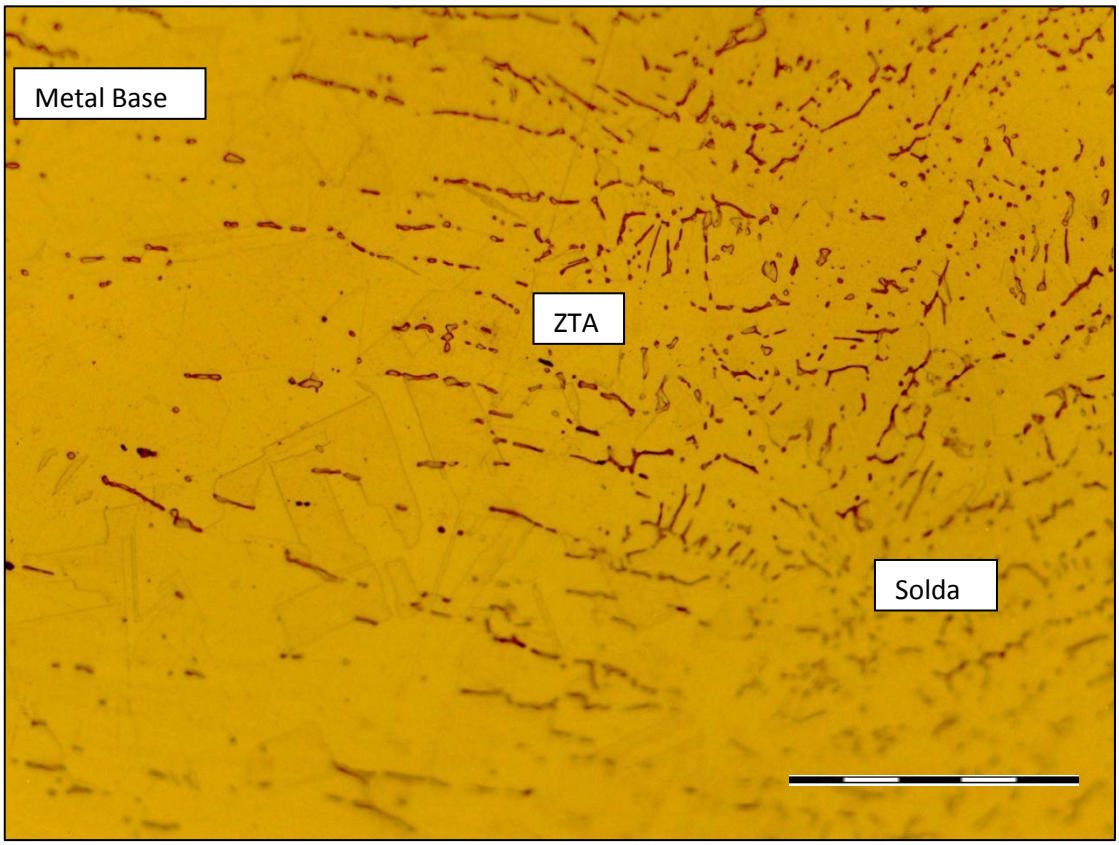


(b)

Figura IV.11 – Micrografia da ZTA do Corpo de Prova 3. Ataque: Água Régia. Aumentos: (a) 100X; (b) 500X.



(a)



(b)

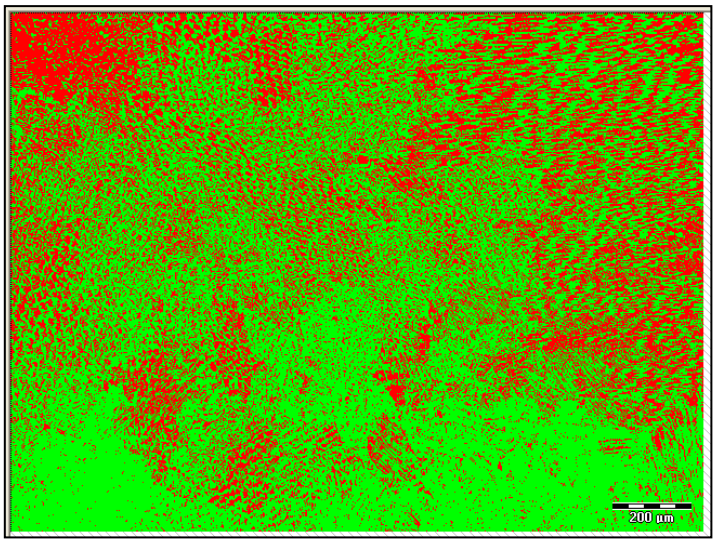
Figura IV.12 – Micrografia da ZTA do Corpo de Prova 4. Ataque: Água Régia. Aumentos: (a) 200X; (b) 500X.

IV.2 Análise de Percentual de Fases

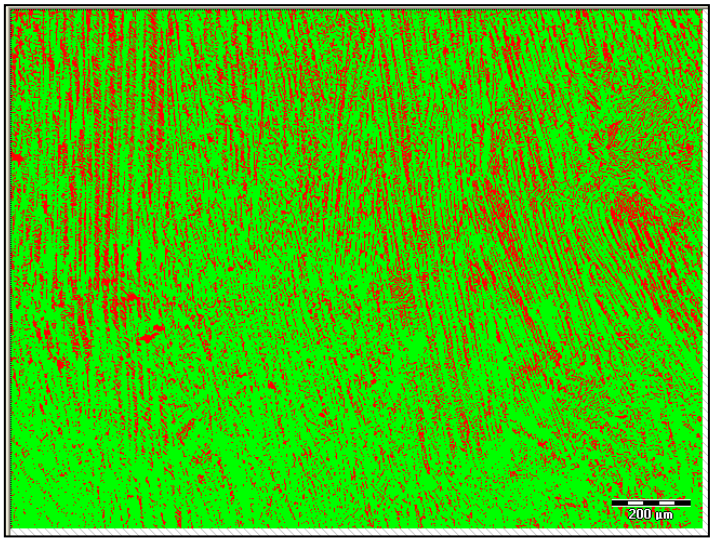
A análise de percentual de fases permitiu quantificar o percentual em área das fases austenita e ferrita nos corpos de prova soldados, através da captura das micrografias e análises através de software de análise de imagens, onde criou através do processamento das imagens a diferenciação das fases por cores, sendo vermelha a fase ferrítica e verde a fase austenítica (figuras IV.13, IV.14, IV.15, IV.16). As análises nos corpos de prova nas regiões acabamento, enchimento e raiz, permitiram observar que os corpos de prova que foram soldados com o metal de adição ER308L apresentaram maiores percentuais de ferrita em suas microestruturas que os corpos de prova soldados com ER316L. Estas análises também permitiram constatar que os corpos de prova que foram soldados com uma corrente de 120 A diluíram mais a ferrita em sua microestrutura. O resultado das análises foram estão descritos na tabela IV.1.

Tabela IV.1: Resultados dos percentuais de fases na microestrutura dos corpos de prova.

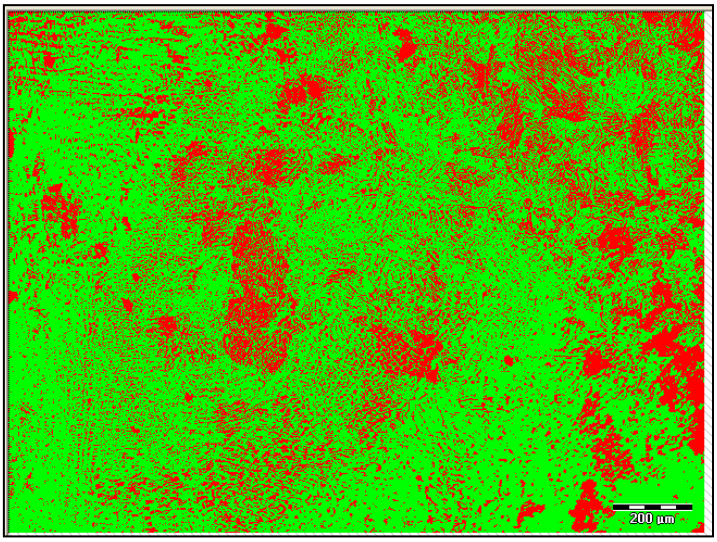
	Região da Junta Soldada					
	Acabamento		**Enchimento**		**Raiz**	
	Ferrita (%)	**Austenita (%)**	**Ferrita (%)**	**Austenita (%)**	**Ferrita (%)**	**Austenita (%)**
CP01	27,02	72,98	18,95	81,05	29,24	70,76
CP02	25,04	74,96	14,58	85,42	20,35	79,65
CP03	13,51	86,49	7,02	92,98	15,19	84,81
CP04	4,22	95,78	17,00	83,00	11,38	88,62



(a)

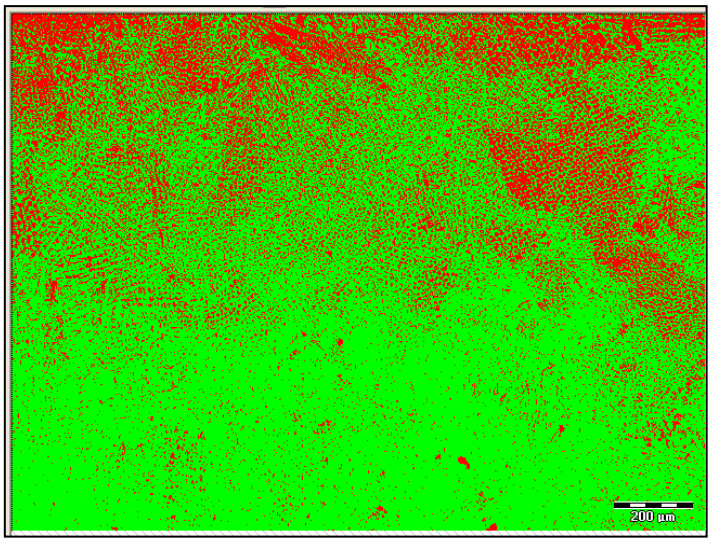


(b)

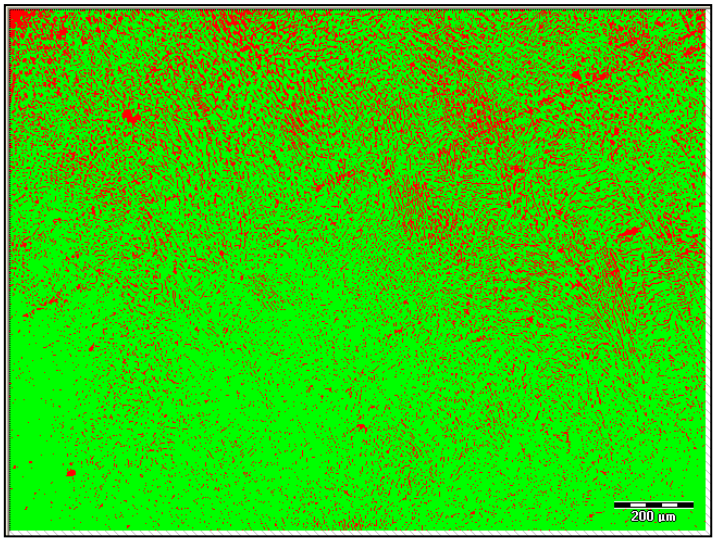


(c)

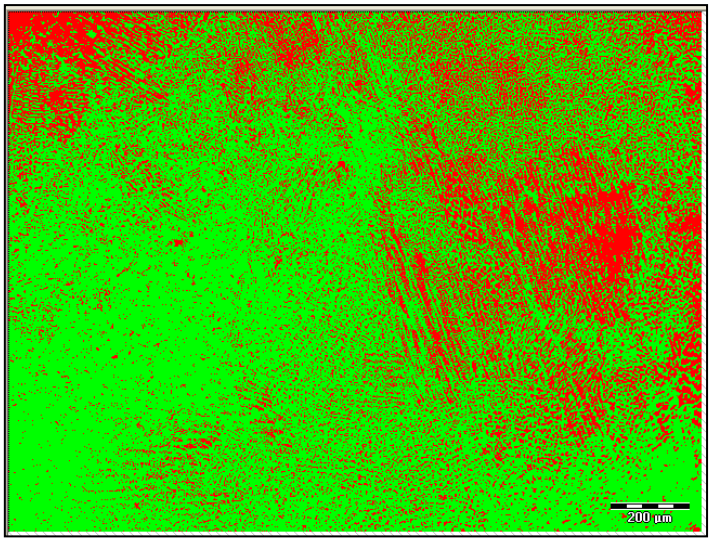
Figura IV.13 – Análise dos percentuais de austenita e ferrita no corpo de prova 01. Regiões (a) acabamento; (b) enchimento; (c) raiz. Imagem de micrografia, aumento 100X, ataque água régia.



(a)

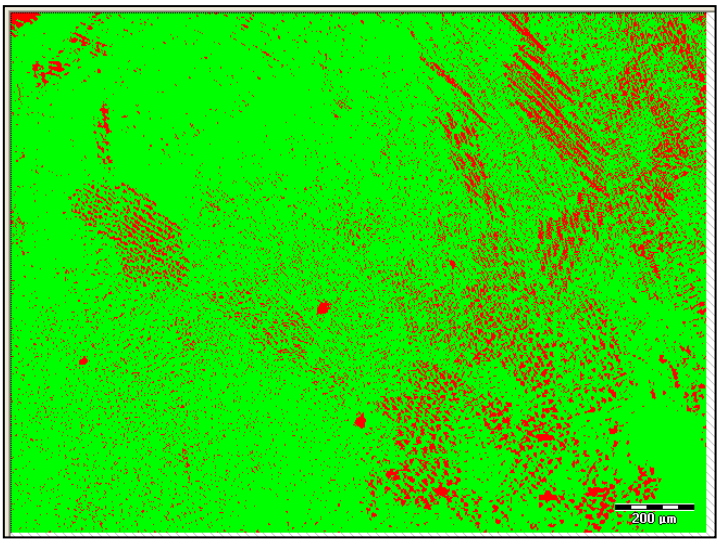


(b)

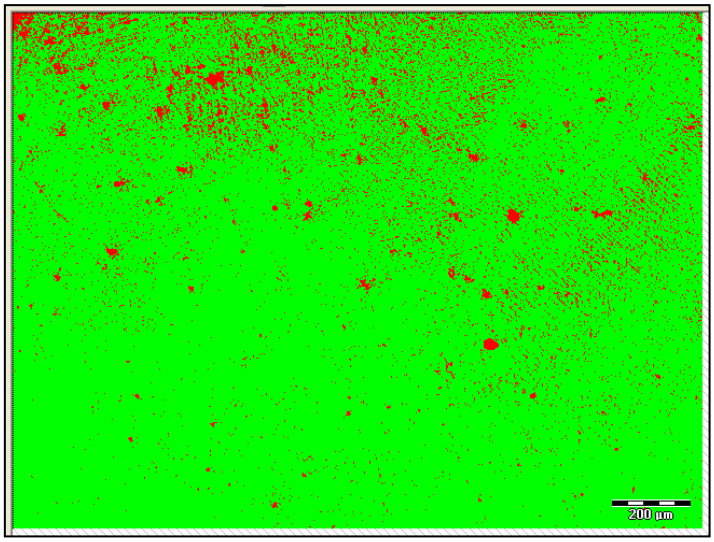


(c)

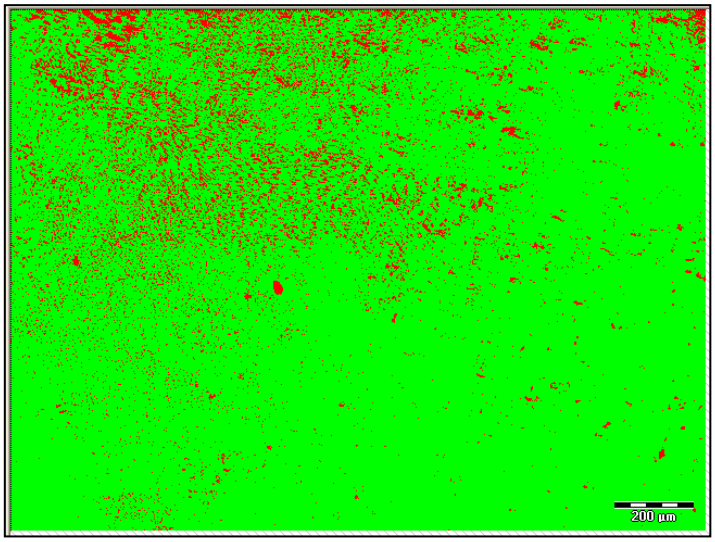
Figura IV.14 – Análise dos percentuais de austenita e ferrita no corpo de prova 02. Regiões (a) acabamento; (b) enchimento; (c) raiz. Imagem de micrografia, aumento 100X, ataque água régia.



(a)

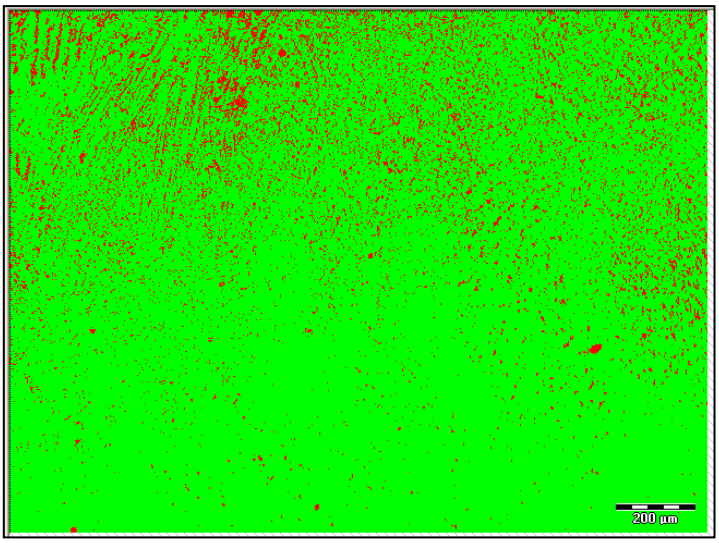


(b)

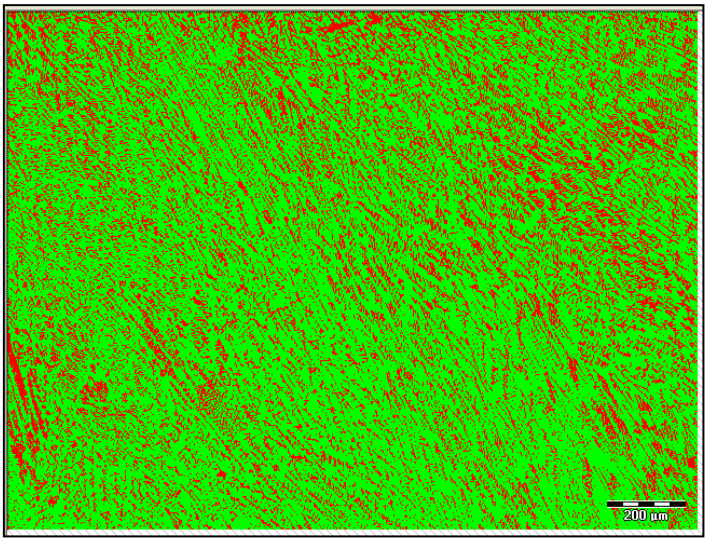


(c)

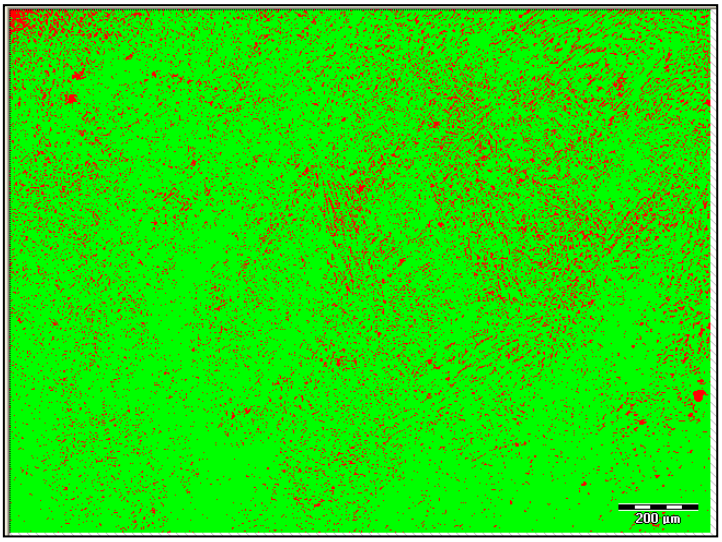
Figura IV.15 – Análise dos percentuais de austenita e ferrita no corpo de prova 03. Regiões (a) acabamento; (b) enchimento; (c) raiz. Imagem de micrografia, aumento 100X, ataque água régia.



(a)



(b)



(c)

Figura IV.16 – Análise dos percentuais de austenita e ferrita no corpo de prova 04. Regiões (a) acabamento; (b) enchimento; (c) raiz. Imagem de micrografia, aumento 100X, ataque água régia.

IV.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Análise por EDS

O resultado da microscopia eletrônica de varredura permitiu observar e ratificar a presença de ferrita na microestrutura, através da análise por EDS. O ensaio foi realizado em uma amostra referente ao corpo de prova 1. A partir de um aumento de 15000X foi possível realizar a análise na sugestiva microestrutura ferrítica (figura IV.17), e também na região da matriz austenítica(figura IV.19). A confirmação se deu devido a característica alfagênica do cromo e gamanênica do níquel, pois observou-se que, nas sugestivas microestruturas de ferrita, o percentual de cromo aumentava e o percentual de níquel diminuía (figura IV.18). O contrário ocorreu na região da matriz, o percentual de cromo diminuiu e o percentual de níquel aumentou (figura IV.20). A análise no corpo de prova 1 confirmou a presença de ferrita em forma de espinha em sua microestrutura, o que permitiu ratificar que a mesma está presente em todos os corpos de prova analisados pelo ensaio de micrografia.

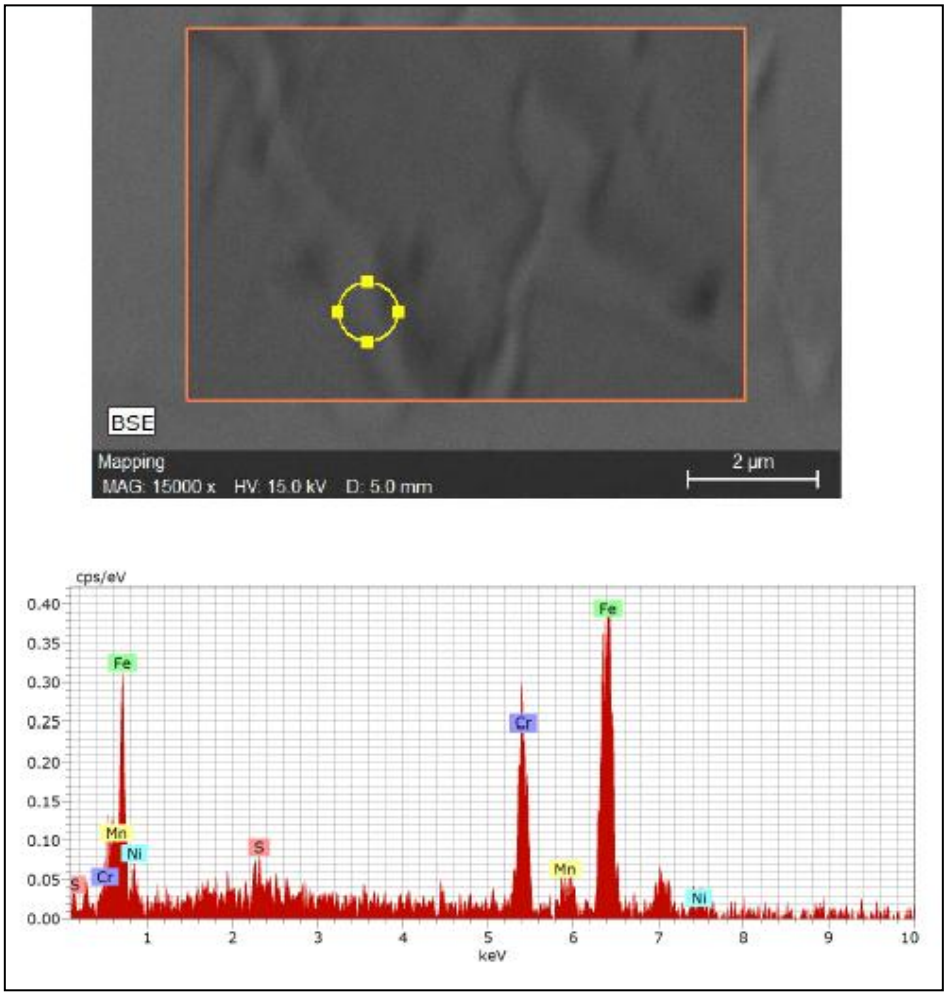


Figura IV.17 – Localização da análise na ferrita, mostrando os picos dos elementos químicos mais relevantes encontrados na amostra do CP01. Aumento: 15000X.

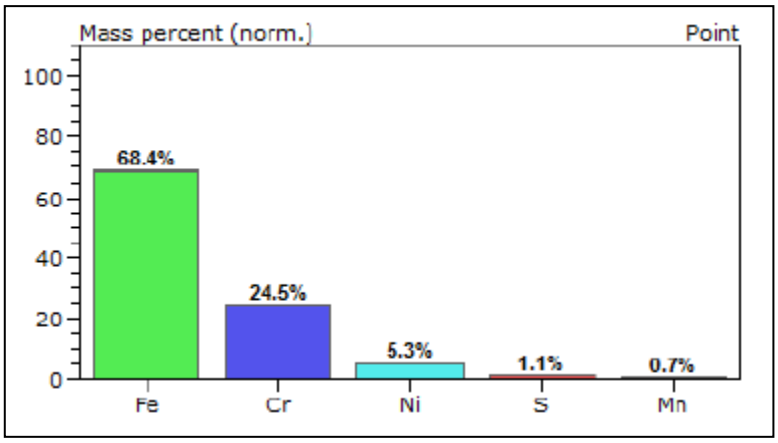


Figura IV.18 – Percentuais dos elementos encontrados na amostra do CP01.

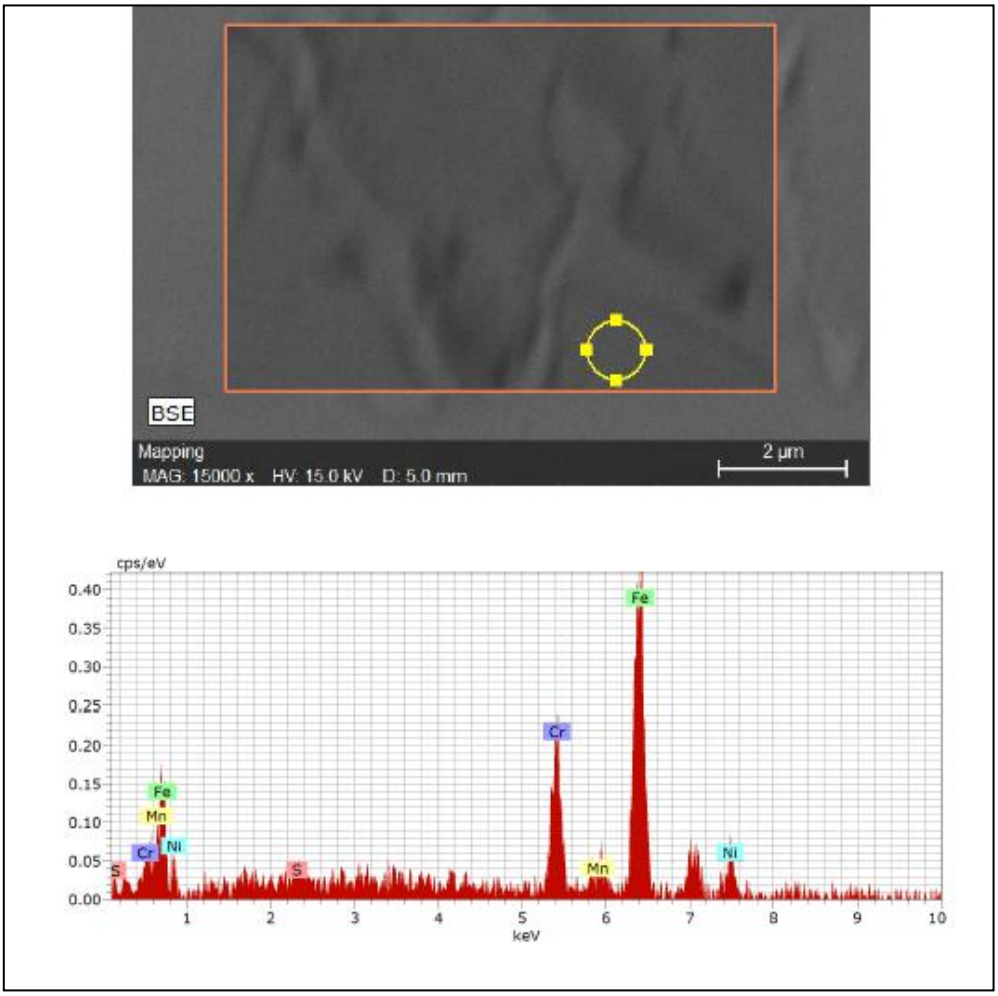


Figura IV.19 – Localização da análise na matriz, mostrando os picos dos elementos químicos mais relevantes encontrados na amostra do CP01. Aumento: 15000X.

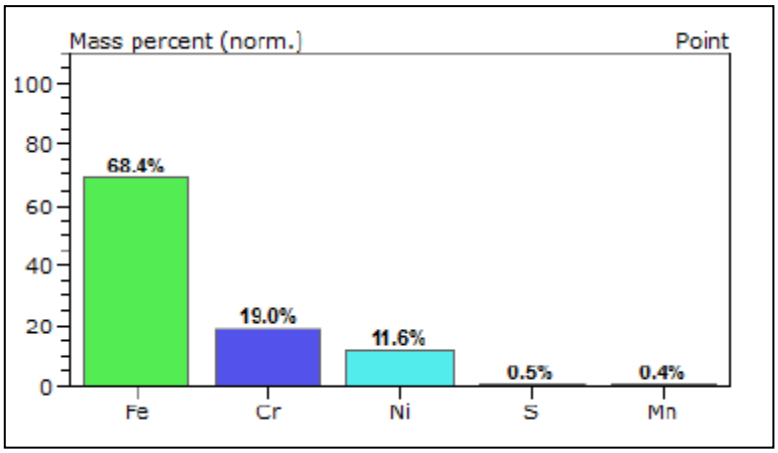


Figura IV.20 - Percentuais dos elementos encontrados na amostra do CP01.

IV.4 Ensaio de Dureza

A dureza da região soldada dos corpos de prova analisados é o resultado de suas composições químicas e suas microestruturas, sendo esta última dependente de parâmetros de soldagem.

O aumento no percentual de ferrita na microestrutura da zona fundida resulta no aumento do limite de resistência devido à criação de contornos sinuosos, dificultando a propagação de trincas, onde ocorre o aumento de dureza do material, fazendo com que ocorra uma perda de ductilidade, tornando assim o material frágil.

A dureza reduz com o aumento do tamanho de grão austenítico. Uma vez que os contornos de grão atuam como barreira aos planos de escorregamento aumentando a resistência e, conseqüentemente, a dureza para amostras com menores tamanhos de grão.

No ensaio de dureza Vickers foi utilizada uma carga de 5 kg (HV5,0) e penetrador de diamante.

Um croqui com o mapeamento das durezas foi desenvolvido para facilitar a localização (figura IV.21). Os resultados de dureza medidos estão descritos na tabela IV.2.

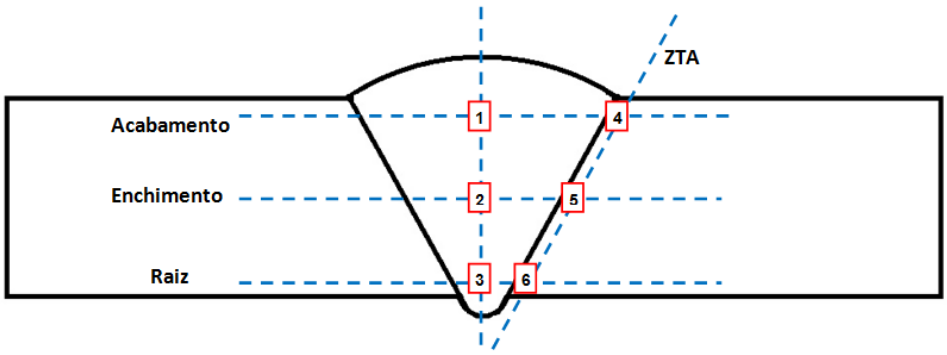


Figura IV.21 – Croqui com mapeamento das durezas.

Tabela IV.2 – Valores de dureza Vickers medidos nos corpos de prova.

	Região	Pontos do croqui	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Desvio Padrão
		1	197	192	188	**192**	**3,68**
	solda	2	201	183	197	**194**	**7,72**
CP 01		3	201	192	168	**187**	**13,93**
		4	188	192	183	**188**	**3,68**
	zta	5	192	197	183	**191**	**5,79**
		6	183	188	197	**189**	**5,79**
		1	192	183	188	**188**	**3,68**
	solda	2	201	192	197	**197**	**3,68**
CP 02		3	183	188	197	**189**	**5,79**
		4	192	192	188	**191**	**1,89**
	zta	5	197	192	188	**192**	**3,68**
		6	183	192	188	**188**	**3,68**
		1	197	188	188	**191**	**4,24**
	solda	2	192	197	188	**192**	**3,68**
CP 03		3	197	183	192	**191**	**5,79**
		4	197	192	201	**197**	**3,68**
	zta	5	206	188	192	**195**	**7,72**
		6	197	192	188	**192**	**3,68**
		1	175	188	183	**182**	**5,35**
	solda	2	192	192	188	**191**	**1,89**
CP 04		3	183	183	192	**186**	**4,24**
		4	192	188	197	**192**	**3,68**
	zta	5	192	201	188	**194**	**5,44**
		6	183	192	183	**186**	**4,24**

IV.5 Inspeção por Ultrassom

IV.5.1 Configuração dos Parâmetros de Inspeção

Antes de iniciar a etapa de inspeção por ultrassom convencional e *phased array* foi utilizado o *software ESBEAM tools* para a configuração e avaliação prévia do comportamento do feixe sônico.

No ensaio de ultrassom convencional foi utilizado o transdutor com duplo cristal que favorece a emissão e recepção da onda sônica, com menor sinal ruído que os demais (figura

IV.23). No ensaio de ultrassom *phased array* foram configurados o transdutor e sapata utilizados no ensaio prático, os parâmetros como 16 elementos, sem abertura entre eles, início dos elementos a partir do primeiro elemento, ângulo de refração de 0 graus, filtro de 4MHz, acoplante, velocidade sônica nominal do material do padrão austenítico (5800 m/s) (figura IV.24). Nas duas técnicas foram utilizadas as ondas longitudinais para a inspeção.

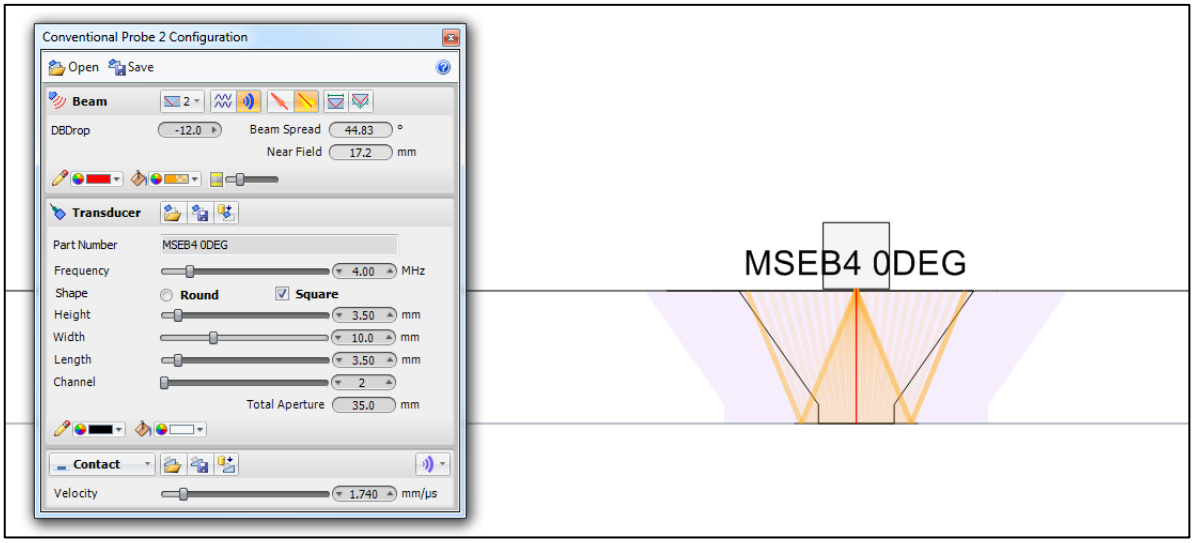


Figura IV.23 – Comportamento do feixe sônico com os parâmetros selecionados para a técnica de ultrassom convencional.

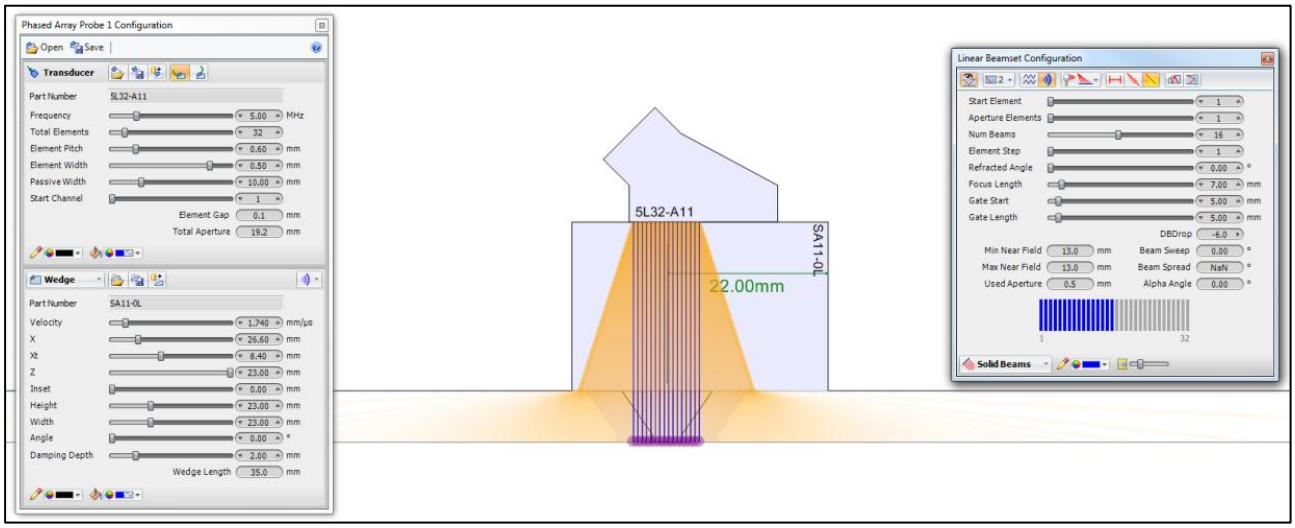


Figura IV.24 – Comportamento do feixe sônico com os parâmetros selecionados para a técnica de ultrassom *phased array*.

IV.5.2 Medição da Velocidade Sônica

A velocidade sônica está diretamente proporcional no dimensionamento das descontinuidades e medição de espessuras, por este motivo os blocos de calibração devem ser apropriadamente calibrados quanto às suas dimensões, furos, entalhes e quanto à velocidade sônica do material que constituí o bloco, pois uma vez que a velocidade sônica está incoerente ao material do bloco, as dimensões detectadas pelo ultrassom são incoerentes, gerando erros de dimensionamento. Importante destacar que antes das inspeções, os aparelhos foram calibrados através dos padrões. As medidas de espessuras só conseguiram ser mensurada nos aparelhos de ultrassom com as velocidades sônicas descritas na tabela IV.3, pois a propagação da onda sônica está relacionada com as constantes elásticas do material, e alguns fatores influenciam, como composição química, tamanho de grão e encruamento, tensões internas, que agem como barreiras na propagação do sônica. A microestrutura austenítica é bem atenuante devido ao seu tamanho de grão, porém quando esta microestrutura possui a diluição da ferrita, a propagação do som melhora. A velocidade sônica apresenta uma correlação inversa com a dureza, ou seja, quanto mais duro for o material, menor é a velocidade sônica em seu interior.

O principal dos problemas encontrados na inspeção destes aços está relacionado a calibração com os padrões não soldados, padrões confeccionados com o metal base do material inspecionado, mas quando este encontra-se termicamente modificado, numa junta soldada, a microestrutura é modificada, e conseqüentemente a velocidade sônica também é alterada.

Antes das inspeções os corpos de prova foram dimensionados em sua espessura, pois o reforço da solda foi removido e reduzido sua espessura para a diminuição da concavidade. A tabela IV.2 descreve os valores medidos.

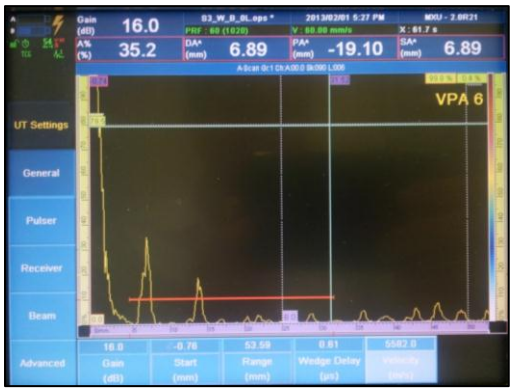
Tabela IV.2 – Valores das espessuras dos corpos de prova.

	CP 01	**CP 02**	**CP 03**	**CP 04**
Espessuras	6,9	6,5	6,4	6,4

As velocidades sônicas foram medidas nas duas técnicas, convencional e *phased array*, e foram descritas na tabela IV.3. As imagens das medições com o ultrassom *phased array* foram registradas na figura IV.25.

Tabela IV.3 – Valores das Velocidades Sônicas medidas nas duas técnicas.

	CP 01	**CP 02**	**CP 03**	**CP 04**
US Convencional	5500 m/s	5705 m/s	6024 m/s	5714 m/s
US *Phased Array*	5582 m/s	5642 m/s	5895 m/s	5845 m/s



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura IV.25 – Registro das medições de velocidades com a técnica de US *phased array*. (a) CP01; (b) CP02; (c) CP03; (d) CP04.

IV.5.3 Medição da Atenuação Sônica

A atenuação sônica nos aços inoxidáveis é considerável e pode interferir na inspeção, pois a atenuação mostra-se linearmente dependente ao aumento do tamanho de grão da austenita. A atenuação é alterada principalmente pela presença de defeitos e refletores como contornos de grão do material e pode, portanto ser relacionada ao limite de resistência do material uma vez que sofre o efeito do tamanho de grão e da presença de defeitos. Nas regiões soldadas as atenuações prejudicam no dimensionamento dos defeitos e também na detecção de defeitos de pequenas proporções. A partir das medições nos corpos de prova feitas pelas duas técnicas, foi possível avaliar e comparar os valores encontrados descritos na tabela IV.4.

Tabela IV.4 – Valores medidos de atenuação sônica nos corpos de prova.

	CP 01	**CP 02**	**CP 03**	**CP 04**
US Convencional	4,3 dB	4,9 dB	2,6 dB	2,3 dB
US *Phased Array*	4,0 dB	3,6 dB	2,4 dB	1,5 dB

A partir dos valores medidos observou-se que os valores detectados pela técnica de ultrassom *phased array* foram menores que a técnica convencional, demonstrando o fato da técnica de *phased array* possuir maior pressão sônica e maior detectabilidade. Nas amostras com maior percentual de ferrita, foram observados maiores valores de atenuação. O maior percentual de ferrita na microestrutura da solda gera contornos sinuosos gerando o efeito de espalhamento e absorção, afetando a atenuação.

IV.5.4 Efeito da Velocidade Sônica no Dimensionamento

O dimensionamento dos defeitos são alterados quando a velocidade sônica utilizada está incorreta. Nesta etapa do estudo para ratificar a afirmação foi realizada uma inspeção com os mesmos parâmetros, utilizando-se da técnica *phased array*. A figura IV.24 e a tabela IV.5 registra o dimensionamento feito com a velocidade padrão do bloco de calibração V2 (5787 m/s) e para velocidades superiores e inferiores. O valor da espessura do bloco padrão V2 medido é de 25 mm.

Após as medições constatou-se que neste bloco não possui o efeito de atenuação que causado com maior efeito nas juntas soldadas. O ajuste da velocidade sônica para uma microestrutura conhecida permite, através do aparelho de *phased array,* ajustar até oito grupos de feixes sônicos com velocidades diferentes, onde pode ser aplicado na divisão do cordão de solda em três ou mais áreas (acabamento, enchimento e raiz, por exemplo), visto que estas

regiões possuem características diferentes devido ao resfriamento e diluição das microestruturas, resultando em diferentes velocidades de propagação sônica.

Através das medições, foi possível verificar que a velocidade sônica está diretamente proporcional no dimensionamento das descontinuidades e medição de espessuras, pois podem ser influenciadas com o resultado da microestrutura no aço inoxidável austenítico. Devido ao fato da região soldada ser anisotropicamente acústica, ou seja, região onde as propriedades acústicas tais como atenuação, dispersão, reflexão, refração, conversão de modo de onda, difração, variam de acordo com a direção do feixe sônico devido à heterogeneidade de orientação de grãos.



Figura IV.24 – Dimensionamento do bloco padrão com aparelho calibrado, onde as velocidades sônicas foram alteradas e os valores de espessura foram registrados.

Tabela IV.5 – Valores medidos de dimensionamento a partir da alteração das velocidades no bloco padrão V2.

Medições	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6***	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
Velocidade Sônica (m/s)	5450	5500	5600	5650	5700	5787*	5800	5850	5900	5950	6000
Espessura Medida (mm)	23,53	23,75	24,21	24,43	24,62	25,0*	25,05	25,27	25,49	25,70	25,92

*Valor de velocidade e espessura padrão do bloco de calibração.

IV.6 Correlação entre os Resultados Microestruturais com Resultados da Inspeção por Ultrassom

Através dos estudos realizados foi possível realizar uma correlação com todos os resultados encontrados. Os parâmetros de soldagem escolhidos afetam diretamente no resultado da microestrutura da solda, que por sua vez afetam na propagação sônica durante uma inspeção. Tendo o conhecimento dos resultados microestruturais é possível realizar ajustes nos parâmetros de inspeção a fim de se obter melhor detectabilidade e dimensionamento dos defeitos, melhorando a eficiência da técnica. Foi considerado a média dos percentuais de ferrita nas regiões de enchimento e raiz, e também, para a dureza foram considerados os valores da região 2, pois após a usinagem a região do acabamento foi retirada para diminuir a concavidade da amostra, deixando-a plana para a inspeção.

No estudo de (BADIDI, 2003) estudaram o efeito da variação microestrutural sobre medidas de velocidades e atenuação sônicas. Amostras com estruturas variando de martensita até ferrita-perlita, para um aço com 0,4% de carbono, foram obtidas segundo o método de Jominy. Neste trabalho foi observado que os valores de velocidade e atenuação são diretamente proporcionais á dureza do material.

A mesma correlação entre dureza e velocidade foi observada no estudo de (SHIGEYUKI, 2000) em amostras de aços inoxidáveis duplex envelhecidas á 475º C, porém os valores de atenuação sônica não foram sensíveis às mudanças estruturais.

O estudo de (PALANICHAMY, 1995) mostrou a aplicação de medidas da velocidade sônica para determinação do tamanho de grão de aços inoxidáveis austeníticos. Foi observado que a velocidade do som é afetada pelo tamanho de grão, isto é, um aumento de tamanho de grão implicará que as ondas ultrasônicas levarão um caminho mais longo para cobrir as densidades do material, ocorrendo a redução da velocidade do som.

No estudo de (GOMES, 2007) com o aço 1045 observou-se que a variação das medidas de velocidade sônica é inversamente proporcional à variação das medidas de dureza do material estudado. Verificou-se também que a velocidade sônica é dependente dos modos elásticos, variando estes com a microestrutura, onde se conclui que a velocidade sônica é um parâmetro promissor para a identificação de tratamentos térmicos do aço.

O aumento no percentual de ferrita na microestrutura da zona fundida resulta no aumento do limite de resistência, diminuindo o tamanho de grão na região soldada do aço inoxidável austenítico, devido à criação de contornos sinuosos, que dificultando a propagação de trincas.

Segundo o estudo de (FONSECA, 2011) o fator do limite de resistência de um aço depende de sua constante elástica que pode se relacionar a velocidade sônica com o limite de resistência deste material. Já no caso da atenuação sônica, a mesma é causada pela presença

de defeitos e refletores como contornos de grão do material e pode, portanto ser relacionada ao limite de resistência do material uma vez que sofre o efeito do tamanho de grão e da presença de defeitos.

No estudo de (T.R.G. Kutty, 1987) e (P. Li, 1992) mostrou a aplicação do ultrassom na medição do percentual de ferrita em aços inoxidáveis super duplex. Neste trabalho, o aumento do limite de resistência do aço inoxidável é gerado pela maior presença de ferrita, que é detectada através da técnica de ultrassom, onde a velocidade ultra-sônica aumenta, quando o percentual de ferrita aumenta.

O fato dos aços duplex e super duplex apresentarem uma matriz ferrítica e a fase austenita secundária, permite uma melhor propagação do feixe sônico, permitindo o aumento da velocidade sônica, devido a não formação da ferrita delta em formato de espinha. Na microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos após soldagem apresenta a ferrita delta em espinha, que possui contornos sinuosos, onde impedem a propagação do feixe, gerando o efeito de espalhamento e redução da velocidade sônica.

Os resultados estão correlacionados na tabela IV.6.

Tabela IV.6 - Correlação dos resultados obtidos nos ensaios.

	CP 01	**CP 02**	**CP 03**	**CP 04**
%Austenita	75,90	82,54	88,90	85,80
%Ferrita	24,10	17,46	11,10	14,20
Dureza no Enchimento	194 HV±7,72	197 HV±3,68	192 HV±3,68	191 HV±1,89
Velocidade Sônica US Convencional	5500 m/s	5705 m/s	6024 m/s	5714 m/s
Velocidade Sônica US *Phased Array*	5582 m/s	5642 m/s	5895 m/s	5845 m/s
Atenuação US Convencional	4,3 dB	4,9 dB	2,6 dB	2,3 dB
Atenuação US *Phased Array*	4,0 dB	3,6 dB	2,4 dB	1,5 dB

Através dos resultados foram encontradas correlações, onde permitiram demonstrar que o aumento do percentual de ferrita na microestrutura, resultou na diminuição da velocidade sônica, e também, no aumento da atenuação sônica. Observou-se também que as amostras com maiores percentuais de ferrita, apresentaram maiores valores médios de dureza, porém com poucas variações. O estudo mostrou concordância com a afirmação do estudo de (PALANICHAMY, 1995) quanto à redução da velocidade em função do tamanho de grão ser maior nos corpos de prova com maiores teores de ferrita, fazendo com que o som percorra um caminho mais longo. O estudo mostrou concordância com a afirmação do estudo de (GOMES, 2007) quanto a diminuição da velocidade, em função do maior valor de dureza.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

O estudo permitiu avaliar a técnica de inspeção por ultrassom *phased array* em juntas soldadas de aço inoxidável austenítico AISI 304L, quanto aos efeitos da microestrutura no dimensionamento de descontinuidades e de espessura.

Com base nos resultados obtidos foi possível observar que os corpos de prova soldados com maior valor de corrente diluíram mais a ferrita em sua microestrutura, tornando a textura mais refinada, e o metal de adição ER308L formou mais ferrita na microestrutura que o metal de adição ER316L, assim como demonstrado no cálculo a partir do diagrama de Schaeffler.

O resultado da microscopia eletrônica de varredura permitiu observar e ratificar a presença de ferrita na microestrutura, através da análise por EDS. A confirmação veio a partir da característica alfagênica do cromo e gamanênica do níquel, onde observou-se que, nas sugestivas microestruturas de ferrita, o percentual de cromo aumentava e o percentual de níquel diminuía. O contrário ocorreu na região da matriz, o percentual de cromo diminuiu e o percentual de níquel aumentou.

Na medição de atenuação sônica observou-se que os valores detectados pelas técnicas de ultrassom convencional e *phased array* foram maiores para as amostras com maior percentual de ferrita.

No estudo foi possível demonstrar que a velocidade sônica está diretamente proporcional no dimensionamento das descontinuidades e medição de espessuras. O ajuste da velocidade sônica incorreta para uma região soldada do aço inoxidável austenítico prejudica o dimensionamento das descontinuidades e de profundidade de defeito.

Através dos resultados foram encontradas correlações, concluiu-se que o aumento do percentual de ferrita na microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos, resulta na diminuição da velocidade sônica e aumento da atenuação sônica, devido à formação de contornos sinuosos e maiores tamanhos de grãos, e aumento nos valores médios de dureza, resultado da maior formação de tensões internas na região soldada.

A técnica de ultrassom *phased array* possui maior pressão sônica que a técnica convencional, permitindo maior confiabilidade nas inspeções. Além disso permite a configuração de grupos de feixes sônicos com velocidades sônicas diferentes, melhorando a detecção e dimensionamento de descontinuidades numa junta soldada.

TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos através deste estudo não têm a pretensão de encerrar o assunto. Esta pesquisa buscou apresentar qualidade e clareza nos resultados, como o objetivo de trazer uma contribuição para que futuros pesquisadores possam examinar com maior profundidade o tema ultrassom *phased array* em aços inoxidáveis. Contudo, podem-se sugerir alguns pontos que surgiram no decorrer desta pesquisa e que, por não ser o objetivo principal, recomenda-se para futuros trabalhos.

- Estudo de outras configurações de inspeção por ultrassom *phased array* como, por exemplo: transdutores angulares de ondas transversais e longitudinais.

- Utilização de análise numérica, através do método de elementos finitos, com o uso do *software CIVA* para simulação de ensaios não destrutivos.

- Análise através de microscopia eletrônica de varredura com EBSD, a fim de avaliar a influência dos planos cristalinos na propagação do feixe sônico em juntas soldadas.

- Análise através da confecção de padrões com defeitos de soldagem mapeados, a fim de validar o uso de multi-grupos na inspeção de defeitos.

- Análise da viabilidade desta metodologia na aplicação da técnica de ultrassom TOFD (*Time of Flight Difraction*).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. GOPICHAND, M. Muralidhara rao, A. V. N. L. Sharma, V. Samuel tony. *Analysis and Estimation of Attenuation Coefficient of Aging EN-19 Steel.* International Journal of Engineering Research and Applications*,* Vol. 2, Cap. 1, pp. 590-595. 2012.

ANDREUCCI, R.: *Ensaio de ultrassom.* Editora Abendi. Julho, 2003.

ASM Metals Handbook. *Nondestructive Evaluation and Quality Control*. Vol. 17, pp 490-628. 1997.

ASTM E 2491. *American Society for Testing and Materials; Evaluating Performance Characteristics of Phased-Array Ultrasonic Examination Instruments and Systems.* 2004.

ASTM E797. *Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method*. 2010.

BADIDI, A., LEBAILI, S. *Grain size influence on ultrasonic velocity and attenuation.* NDT & International, v. 36, pp.1-5, 2003.

BAR-COHEN, Y. *et al*. "*Nondestructive Evaluation and Quality Control*". Metals Handbook. ASM International, 9th edition, Volume 17, 1989.

BIANCHI, Daniela. *Efeitos da energia de soldagem na microestrutura do aço inoxidável superduplex UNS S32750*. Dissertação de Doutorado, UFPR, Curitiba, 2011.

BOND, D. *Avaliação de revestimentos soldados processados com materiais atomizados.* Dissertação de D.Sc. PIPE/UFPR, Curitiba, Paraná, Brasil, 2008.

BROOKS, J.A.; Thompson, A.W. *Microstructural development and solidification cracking susceptibility of austenitic stainless steel welds*. International Materials Reviews, 36, 1991, pp. 16-44.

CALLISTER, W.D. *Materials science and engineering*. Nova York: John Wiley & Sons Inc, 1991.

CHIAVERINI, V., *Aços e Ferros Fundidos.* ABM 7ªEd., 1996.

COSTA, Antônio Claret. *Ensaio por ultrassom com as técnicas convencional A – Scan e Phased Array em juntas soldadas dissimilares de aços carbono e aço inoxidável austenítico*. Dissertação de Mestrado, UFMG, Minas Gerais, Brasil, 2011.

FONSECA, Eduardo. *Determinação indireta das propriedades mecânicas de aço ASTM A36 laminado com o uso de ultrassom.* Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

GINZEL, Eduard. *Phased Arrays and Mechanised Ultrasonic Testing*. 2ª Ed. Prometheus Press. Canadá, 2003.

GOMES, M. S. B. S., NÓBREGA, L. H. M. S. *Estudo da correlação entre microestrutura e velocidade sônica de um aço 1045 tratado termicamente*. II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba. 2007.

KUMAR, A., Jayakumar, T., Palanichamy, P., Baldev, R. *Influence of Grain Size Measurement on Ultrasonic Spectral Parameters in AISI Type 316 Stainless Steel*. Scripta Materialia, 40, 333-40, 1999;

LOBERTO, Tancredo. *Estudo da viabilidade do ensaio de ultrassom na inspeção de juntas soldadas de aços inoxidáveis austeníticos AISI 316.* Dissertação de Mestrado, PUC-PR, Curitiba, 2007.

MODENESI, Paulo J. *Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis.* Vol. 1. SENAI-SP, São Paulo, 2001.

NTD. *Nondestructive Testing*. NDT Reserach Center. Disponível no endereço eletrônico: http://www.ndt-ed.org. Acessado em agosto de 2012.

OLYMPUS, *Advances in Phased Array Ultrasonic Tecnology Aplications*. Canada. 2010.

OLYMPUS, *Introduction to Phased Array Ultrasonic Tecnology Aplications*. Canada. 2010.

P. LI, S. L. Chu, C. P. Chou, and F. C. Chen. *Use Of Ultrasonic Velocity For Nondestructive Evaluation Of Ferrite Content In Duplex Fe-Mn-Ai Alloy Steels*. Scripta Metallurgica et Materialia. Vol. 26, pp. 127-132, 1992.

PADILHA, A. F., L. C. Guedes. *Acos Inoxidáveis Austeníticos - Microestrutura e Propriedades.* Hemus, 1a ed., São Paulo, 1994.

PALANICHAMY, P. *Ultrasonic velocity measurement for estimation of grain size in austenitic stainless steel.* NDT & Int. 28 pp. 179-185. 1995.

PAPADAKIS, E.P. "*Physical acoustics and microstructure of iron alloys"*, Rev 29, pp 1-24, 1984.

PIRES, Gustavo Pinto. *Inspeção Ultra-Sônica Utilizando Transdutores Phased Array: Simulação Computacional para Detecção de Trincas.* Dissertação M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

Revista TN Petróleo. *Suplemento especial*. Ano XII. Número 81. Editora Benício Biz. Janeiro, 2012.

RUIZ, A., Ortiz, N., Carreón, H., Rubio, C. *Utilization of ultrasonic measurements for determining the variations in microstructure of thermally degraded 2205 duplex stainless steel*. Journal of Non Destructive Evaluation 28, p 131-139, 2009.

SANTIN, J. L.. *"Ultrassom: Técnica e Aplicação".* 2ª Edição, Erechim, Editora São Cristóvão. 2003

SCHMERR JR., L. W. *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation: A Modeling Approach.* New York, Plenum Press. 1998.

SHIEGEYUKI, H. W. *Ultrasonic detection of thermal embrittlement of duplex stainless steel.* International Conference on Nuclear Engeneering, v.5, ASME, pp 215-223, 2000.

SILVA, A. L. C., P. R. Mei. *Aços e Ligas Especiais.* 2ª edição. São Paulo, Sumaré, 1988.

T.R.G. KUTTY, K.N. Chandrasekharan, J.P. Panakkal. *Use of ultrasonic velocity for nondestructive evaluation of ferrite content in duplex stainless steels*. NDT International. ScienceDirect. Dezembro, 1987.

VARY, A. Ultrasonic measurement of material properties in *Research Techniques in Non-Destructive Testing.* Vol IV, pp 159-204, ed R.S. Sharpe, Academic Press, New York, 1980.

WILCOX, P. D.; HOLMES, C.; DRINKWATER, B. W. *Advanced Reflector Characterization with Ultrasonic Phased Arrays in NDE Applications. IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 54, N. 8. 2007.